


3 1761 11708372 5

CA1
MT 47
-78R49

GOVT

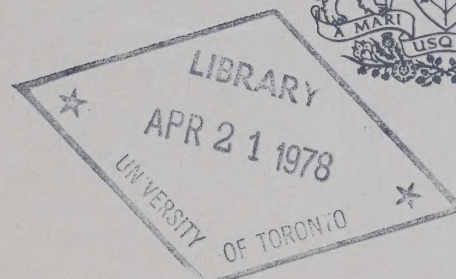


Digitized by the Internet Archive
in 2023 with funding from
University of Toronto

<https://archive.org/details/31761117083725>

CA1
MT47
-78R49

Government
Publications



1/2 Canada
3/2

MANUSCRIPT REPORT SERIES

No. 49

*L'analyse des données de courant;
théorie et pratique*

G. Godin

1978

2
Marine Sciences Directorate
Department of Fisheries and
the Environment, Ottawa

Publié par



Pêches et Environnement
Canada

Service des pêches
et de la mer

Direction de l'information
et des publications scientifiques
Ottawa K1A 0E6

Published by

Fisheries and Environment
Canada

Fisheries and
Marine Service

Scientific Information
and Publications Branch

CA1
MT47
78R49

Marine Sciences Directorate

Manuscript Report Series

No. 49

L'analyse des données de courant; théorie et pratique

Gabriel Godin

1978

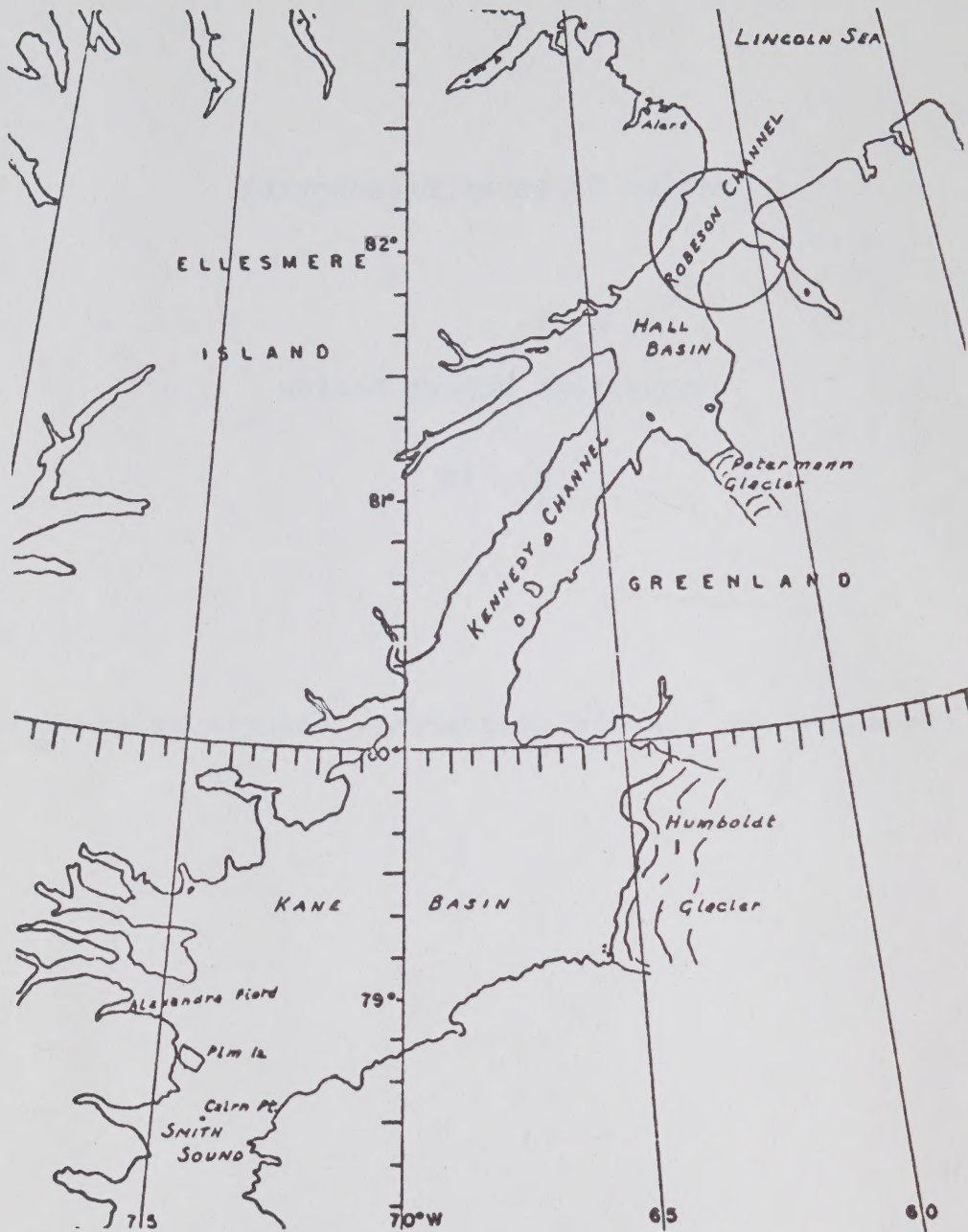


Fig. 1. L'emplacement géographique où Chow et Sadler ont effectué leurs mesures de courant.

Table des matières

1. Abstract - Résumé

A

Théorie

2. Introduction

3. L'analyse

3.1 La représentation des observations de courant

3.2 La mesure des angles

3.3 Réduction des orientations géographiques en angles trigonométriques

3.4 Décomposition en composantes est et nord

3.5 L'inspection préliminaire des données de courant

3.6 Les étapes de l'analyse

3.6.1 La décomposition des observations de courant en composantes polarisées

3.6.2 L'ellipse composante

3.6.2.1 Formes extrêmes de l'ellipse composante

3.6.3 Spectres de puissance

3.6.3.1 La reconstitution des éléments de l'ellipse composante à l'aide des spectres de puissance

3.6.3.2 Les spectres croisés

3.6.3.2.1 La marée et le courant

3.6.3.2.2 Courant contre courant

3.6.3.2.3 La corrélation totale

3.6.4 L'analyse harmonique

4. Détails supplémentaires

4.1 Formules pratiques pour le calcul des spectres de puissance et des spectres croisés

4.2 Lissage et décimation

4.3 Le choix du nombre de bandes de fréquences

5. Illustrations

B

Application: *l'étude des données de courant recueillies par Chow et Sadler dans le Détroit de Robeson durant les expéditions de 1971 et 1972.*

6. Introduction

7. La mise en graphique des données de courant recueillies

8. Les stations côtières

9. Le courant moyen

10. Les analyses

11. Synthèse et interprétation préliminaire

11.1 Le courant moyen

11.2 Les fluctuations lentes du courant moyen

11.3 La marée semidiurne

11.4 La bande diurne

11.5 Les oscillations de haute fréquence

11.6 Spectres croisés entre différents sites de courantomètres

11.7 La décomposition du courant moyen en composantes déterminées par l'orientation du lit

11.8 Directions prédominantes des courants

12. Remerciements

13. Bibliographie

14. Liste des figures

1. ABSTRACT - RESUME

We describe in this paper the mathematical techniques used in the reduction of current observations. We consider first the problem of the representation of such data, which are vectorial and which are often collected simultaneously at different depths and at different points in the horizontal. Then we explain the reasons why it is always preferable to decompose them into east and north components. Afterwards it is necessary to scrutinize the material carefully before venturing into any work of analysis whatsoever, because the data are extremely variable and are often riddled with mistakes. The spectral decomposition of currents leads immediately to the concept of the constituent ellipse and to its extreme forms; this decomposition is done in terms of a sum of harmonics or with the help of power spectra. One can also estimate the spectral structure with the help of admittance calculations if data on the water level at a neighbouring point are available. One can also calculate cross spectra between various sequences of current data and calculate their total correlation. We give practical formulas for the calculation of all the quantities mentioned and indications on the choice of the number of frequency bands and on the need to smooth and decimate the raw data. The work of analysis is illustrated by calculating the parameters which can be derived from the sets of currents observed in Robeson Channel.

There Chow and Sadler carried out a series of current measurements in the subsurface layer during the springs of 1971 and 1972. The measurements turned out to be of good quality with a few exceptions: they therefore deserve the closest scrutiny as they could further the understanding of the linkage between the Arctic and Atlantic Oceans.

The measurements indicate unequivocally the existence of a strong southerly flow which may reach a peak magnitude of 45 cm/sec in its core, which is to be found at a depth of between 100 and 400 meters. This flow exists predominantly over the western third portion of the channel, thus hugging the Canadian side of the channel; it extends over nearly the whole vertical column and it is still quite intense near the bottom. This southerly flow fluctuates both in magnitude and in extent. When it is most intense, it extends over a larger cross section of the channel and may even be felt in the upper layers near the Greenland shore; when it weakens, it is more restricted to the west and retreats to the Canadian side with reduced intensity. Although the data do not support it patently, there is some indication of a return northerly flow in the eastern portion of the channel; it appears to be present on an almost permanent basis in the bottom portions of the channel on the Greenland side and, during stages of weakened southerly flow, it may be felt right up to the surface layer there. The area where the southerly flow fluctuates most intensely lies near the bottom on the Canadian side.

There exists some evidence of a transverse structure in this system of steady flow in Robeson Channel and of the possible existence of upwelling on the Canadian side.

The tidal currents are also strong and what we could call the normal tidal currents, undisturbed by the frictional effects of the surface ice and of the bottom, can be found in a layer extending from 100 to 500 meters, although it is difficult to say from the state of the measurements, if the tidal currents extend uniformly across the channel or if they are more intense on the Canadian side. The semidiurnal currents reach an intensity of over 30 cm/sec

and could reach their maximum intensity simultaneously all across the channel, although the questionable quality of the data on the Greenland side makes this difficult to ascertain. The diurnal tidal currents are more problematic: they indicate some tendency to progress from east to west across the channel, but seldom exceed 10 cm/sec.

When the steady current undergoes fluctuations, it rotates clockwise in the core of the water mass while it turns counterclockwise near the Greenland side in the near-surface and near-bottom layers. The tidal currents are nearly rectilinear in the core of the water mass and rotate counterclockwise in the near-surface and near-bottom layers.

On décrit dans ce mémoire les techniques mathématiques employées dans le dépouillement des données de courant. On étudie d'abord le problème de la représentation de ces données qui sont vectorielles et qui souvent sont recueillies simultanément à différentes profondeurs et à différents points de la surface. Puis on explique les raisons pour lesquelles il est toujours préférable de les décomposer d'abord en composantes est et nord. Par après il est nécessaire d'inspecter ces données avec soin avant de s'aventurer dans quelque travail d'analyse que ce soit, car elles sont très variables et souvent entachées d'erreurs. La décomposition spectrale des courants conduit immédiatement au concept de l'ellipse composante et de ses formes extrêmes; cette décomposition s'effectue en termes d'une somme d'harmoniques ou à l'aide des spectres de puissance. On peut aussi estimer la structure spectrale à l'aide de calculs d'admittance, si les données sur le niveau d'eau en un point avoisinant sont disponibles. On peut aussi calculer les spectres croisée entre diverses suites de données de courant et calculer leur corrélation totale. On donne des formules pratiques pour le calcul de toutes les quantités mentionnées et des indications sur le choix du nombre de bandes de fréquence et sur la nécessité de lisser et décimer les données originales. On illustre ce travail d'analyse en calculant les paramètres qui peuvent être dérivés des suites de courants observés dans le Détroit de Robeson.

Chow et Sadler ont effectué une série de mesures de courant dans la sous-surface et dans la masse d'eau elle-même du Détroit de Robeson à une latitude de près de 82°N au cours des printemps de 1971 et 1972. Ces mesures sont de bonne qualité à quelques exceptions près; elles méritent par conséquent l'inspection la plus minutieuse puisqu'elles pourraient aider à approfondir la compréhension du raccord entre les océans Arctique et Atlantique.

Ces mesures révèlent sans aucune équivoque l'existence d'un fort courant qui se dirige vers le sud et qui peut atteindre une grandeur maximale de 45 cm/sec dans son noyau qui se trouve entre 100 et 400 mètres. Ce flot se trouve sur le tiers de la partie occidentale du Détroit, suivant ainsi étroitement le côté canadien. Il s'étend sur presque toute la colonne verticale et il est encore assez intense près du fond. Ce flot varie dans sa grandeur et dans ses dimensions. Quand il est à son plus fort il s'étend sur une plus grande largeur du Détroit et peut même se faire sentir dans la couche supérieure près de la côte du Greenland; quand il faiblit, il est plus restreint vers l'ouest et prend refuge dans son noyau du côté canadien avec une intensité réduite. Il existe une certaine indication d'un courant de retour

dirigé vers le nord dans la portion orientale du Détroit, bien que les données ne donnent pas d'indication absolue de ce fait; ce courant semble être présent d'une façon quasipermanente dans les régions du fond du côté du Greenland et, durant les stages de flot affaibli vers le sud, il peut se manifester jusqu'à la couche de surface dans cette partie du Détroit. L'endroit où le courant dirigé vers le sud fluctue le plus intensément se trouve près du fond, du côté canadien.

Il existe une certaine évidence d'une structure transversale dans ce système de courants et de l'existence possible d'upwelling du côté canadien.

Les courants de marée sont intenses aussi et ceux que nous pourrions appeler les courants de marée normaux, i.e. ceux qui ne subissent pas l'influence de la friction de la glace à la surface et celle du fond, se trouvent entre 100 et 500 mètres, bien qu'il soit difficile de dire, à cause de la qualité des mesures, si ce noyau de courants s'étend uniformément à travers le Détroit ou est plus restreint au côté canadien. Les courants semidiurnes atteignent une intensité qui dépasse 30 cm/sec dans ce noyau et pourraient atteindre leur intensité maximale simultanément à travers le Détroit, bien que la qualité douteuse des données recueillies du côté du Greenland puisse mettre ceci en doute. Les courants de marée diurnes sont plus compliqués: ils semblent progresser de l'est à l'ouest à travers le Détroit mais ils dépassent rarement 10 cm/sec.

Le courant moyen tend à tourner vers la droite dans le coeur de la masse d'eau quand il se met à varier alors qu'il se met à tourner vers la gauche du côté du Groenland dans les couches près de la surface et près du fond. Les courants de marée sont presque rectilignes à l'intérieur de la masse d'eau alors qu'ils tournent à gauche près de la surface et près du fond.

A

*Théorie**

2. INTRODUCTION

Si l'on immerge un courantomètre en un point donné dans un estuaire ou un océan et s'il fonctionne adéquatement, on obtiendra éventuellement une suite de lectures sur la vitesse et l'orientation du courant à ce point. Avant de s'aventurer dans l'étude de ce paramètre océanographique, il est bon de se demander ce qu'il représente et quelle valeur potentielle il peut avoir pour la compréhension du mouvement de la masse d'eau.

Nous nous rendons compte tout d'abord qu'une mesure de courant est une mesure ponctuelle dans un continuum à trois dimensions animé de mouvements dans toutes les directions et qui peut posséder une structure horizontale, verticale et transversale. La mesure ponctuelle du courant ne nous apprend rien sur les courants à des niveaux supérieurs ou inférieurs dans la même colonne d'eau et ne nous dit rien non plus sur ce qui se passe dans le voisinage de cette même colonne. Pour connaître le flot dans une section verticale donnée, il faut un échantillonnage très serré; ceci est rarement pratique

* Ces notes sont basés sur les travaux de Taylor (1920), Godin (1967) Fofonoff (1969), Gonella (1972) et Mooers (1973).

puisque les mesures de courant sont laborieuses et dispendieuses. De plus, en contraste avec le niveau d'eau, la température et la salinité, le courant est une quantité différentielle affectée d'une forte variabilité spatiale et temporelle. Il est donc difficile, lorsqu'on est mis en présence d'une suite de telles mesures, de décider à première vue si elles représentent vraiment le paramètre recherché ou si elles reflètent tout au plus la danse du courantomètre au bout de sa corde d'amarrage. En fait on ne sait pas à l'avance où situer les points de mesures dans une section, qui nous donneraient la vue d'ensemble la plus authentique des transports; on ne connaît même pas le taux auquel il faut échantillonner. On peut se faire une idée de la position de ces points si l'on étudie soigneusement la structure hydrographique de la masse d'eau d'abord, afin d'élaborer des hypothèses assez solides sur ses mouvements internes qui aideront à suggérer les points de mesure les plus prometteurs; par après il faut tenter d'obtenir un ensemble d'enregistrements simultanés le plus long possible. Il semble inconcevable que l'on ose s'aventurer dans la mesure de courants sans ces études préalables. Donc si l'on veut faire des mesures de courants, il faut s'assurer:

- a) que ces mesures sont nécessaires,
- b) que les instruments utilisés sont fiables, que les techniques d'amarrage affectent le moins possible les données recueillies, que la personne qui se sert de ces instruments peut juger objectivement leur comportement au cours de l'enregistrement et la qualité des mesures recueillies,
- c) que les points de mesure ont été choisis judicieusement et que l'ensemble des données peut vraiment contribuer à la compréhension du mouvement d'eau dans la section donnée et
- d) que quelqu'un est disposé à les étudier de très près afin d'en tirer le maximum d'information possible.

3. L'ANALYSE

3.1 La représentation des observations de courant

On peut représenter les données de courant recueillies en un point par la suite de nombres:

$$\{\underline{w}(t)\} \equiv \{r(t), \theta(t)\} \quad t = -T/2, \dots, 0, \dots, T/2 \quad (1)$$

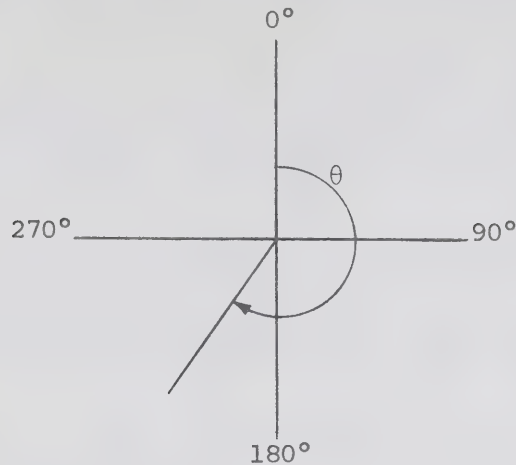
t est la variable temps; elle est discontinue et le taux d'échantillonnage n'est pas spécifié dans (1). T est l'intervalle total d'observations en heures, $r(t)$ est la vitesse du courant au temps t ; elle peut avoir les dimensions noeuds, cm/sec, m/sec etc. θ est l'orientation du courant à cet instant: nous devons étudier de plus près cette variable dans le prochain paragraphe.

3.2 La mesure des angles

Deux systèmes de mesure d'angle sont employés concurremment dans l'étude des courants, ce qui est une source constante d'erreur et de confusion.

1) Le système géographique

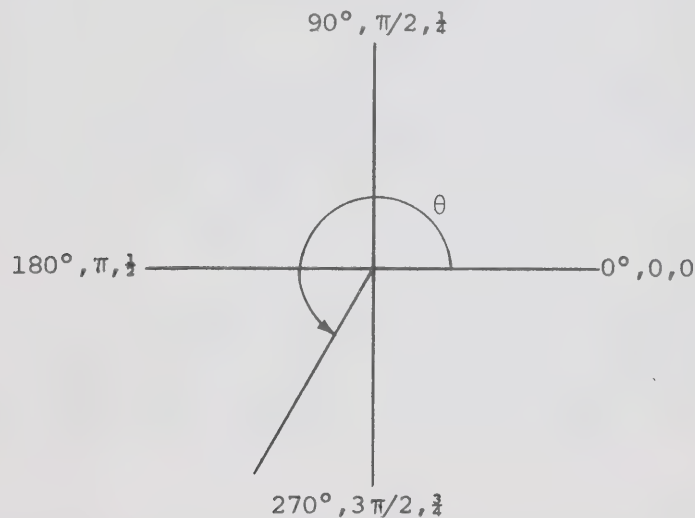
Les angles sont mesurés à partir du nord et le sens positif de rotation est à droite.



C'est le système employé en général dans les enregistrements des courantomètres.

2) Le système trigonométrique (ou mathématique)

Les angles sont mesurés à partir de l'est et le sens positif de rotation est à gauche.



Les angles sont donnés soit en degrés, soit en radians, soit en cycles; nous avons montré les trois mesures pour le même angle dans la figure ci-dessus. La mesure en cycles est la plus rationnelle; d'autre part le calcul différentiel est considérablement simplifié si l'on travaille en radians. Tant qu'à la mesure en degrés, elle a une origine mésopotamienne et on s'en sert depuis au moins 4000 ans.

Le système trigonométrique est le système employé en mathématiques et c'est le seul que l'ordinateur puisse comprendre et manipuler. Ceci implique que toutes les opérations mathématiques et toute interprétation des angles calculés par l'ordinateur doivent se faire dans le système trigonométrique.

3.3 Réduction des orientations géographiques en angles trigonométriques

Si une orientation est donnée dans le système géographique, on la transforme en un angle trigonométrique à l'aide de la formule:

$$\theta_{\text{trig}} = -\theta_{\text{géog}} + \pi/2 \quad (2)$$

Après cette transformation, quand nous parlons d'un angle θ , nous sous-entendons toujours un angle trigonométrique. Les données prêtes à analyser prennent la forme:

$$\{\underline{w}(t)\} \equiv \{r(t), \theta(t)\} \quad t = -T/2, \dots, 0, \dots, T/2$$

qui est identique à celle que nous avons donnée précédemment mais où maintenant il n'y a plus d'équivoque sur le système d'angle employé,

3.4 Décomposition en composantes est et nord

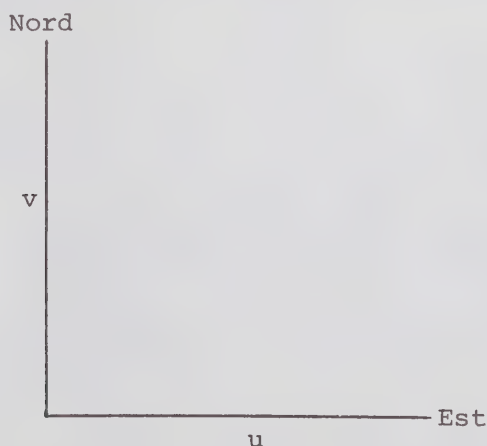
L'analyse se porte en fait sur les composantes cartésiennes de la suite (1). Ces composantes que nous pouvons appeler X et Y le long de l'abscisse et de l'ordonnée, s'obtiennent à l'aide des relations:

$$X = r \cos \theta \equiv u \quad (3)$$

$$Y = r \sin \theta \equiv v \quad (4)$$

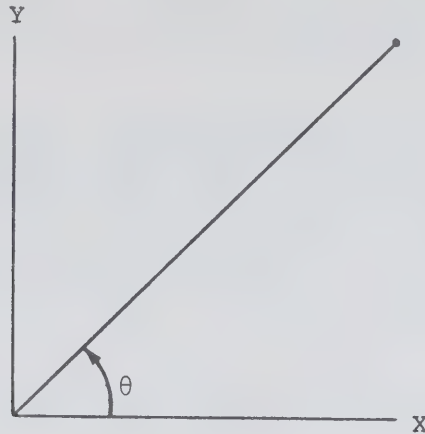
La dernière figure nous indique que X est la composante est du courant et Y, la composante nord. Cette décomposition doit être faite systématiquement avant tout travail d'analyse et celui-ci se portera effectivement sur la suite:

$$\{\underline{w}(t)\} = \{u(t), v(t)\} \quad (5)$$

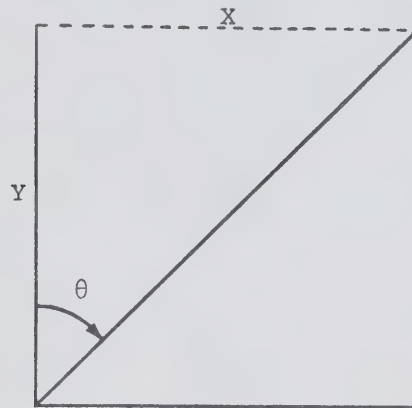


Si l'on s'obstine à ne pas faire cette transformation qui semble si simple à première vue, ou si on la fait de travers, on s'expose à tout gâcher et on ne pourra jamais comprendre quoi que ce soit. Revisons donc les erreurs possibles:

a) on applique les transformations (3) et (4) à des angles géographiques. De ce cas plutôt que d'obtenir les composantes (X,Y) désirées:



on obtiendra les composantes (Y,X) :



b) plutôt que de calculer les composantes est et nord, on recherche les composantes le long et en travers du lit de la section mais on oublie qu'en mathématiques, la composante Y est à gauche de la composante X et non pas à droite. Alors, plutôt que d'obtenir les composantes

$$(X,Y)$$

comme on le devrait, on obtiendra les composantes

$$(X,-Y)$$

dans un système à orientation arbitraire,

c) encore une fois, on recherche les composantes le long et en travers du lit de la section mais que cette fois, on tient compte du fait que Y doit se trouver à gauche. Cette fois-ci on ne fait pas d'erreur mathématique fondamentale puisque l'on obtient des composantes orthogonales

$$(X,Y)$$

mais on fait une erreur de méthodologie qui va compliquer inutilement les résultats des analyses. Cette erreur de méthodologie est qu'on a fait un choix de coordonnées à orientation arbitraire plutôt que de se restreindre à un système cartésien conventionnel est-nord: ce choix d'une orientation arbitraire est tout à fait inutile, il est une source inépuisable de confusion et il n'aide en rien à l'analyse.

Un tel choix peut sembler raisonnable au point de vue physique. Le chercheur se dit: "La composante principale du courant doit se trouver le long du lit, appelons la donc X". En fait, les courants vont où ils veulent et bien souvent leur composante principale dévie assez fortement de l'orientation du lit. Par conséquent on n'a rien à gagner par ce choix, ni du point de vue physique, ni du point de vue mathématique: on se complique tout au plus l'existence.

3.5 L'inspection préliminaire des données de courant

Avant d'attaquer l'analyse il faut faire une inspection préliminaire des données de courant et décider à l'avance de la forme que les résultats prendront. Au premier abord, l'analyse ne supplée qu'une masse de chiffres qui peut aveugler plutôt qu'éclairer le chercheur. Il faut donc se faire une idée assez précise du genre de réponse que l'on va obtenir: le sens de rotation du courant, son intensité moyenne, son orientation, sa tendance à la rectilinéarité ou à la rotation, son caractère diurne, semidiurne ou mixte, sa relation dans le temps avec la marée côtière, la présence et l'orientation d'un courant moyen et ses fluctuations dans le temps. Il faut aussi se faire une idée de la structure verticale et horizontale du flot en comparant les courants observés simultanément à diverses profondeurs sur un même amarrage ou à une même profondeur en différents points de la section. Après cette inspection, on peut se faire une idée assez claire du caractère des mesures avant même d'avoir fait le moindre calcul. Il devient alors infiniment plus aisé de suivre, vérifier et interpréter les résultats des analyses. Une telle critique aide aussi à détecter des erreurs fondamentales qui auraient pu être faites au cours des manipulations préliminaires des observations de courants. Cette inspection des données et cette critique très stricte des résultats des analyses sont absolument essentielles. L'étude des données de courant est hérissée de difficultés et elle peut être facilement gâchée par une confiance trop aveugle donnée aux premiers résultats des analyses.

Il nous reste maintenant à décrire comment se fait le travail d'inspection. Nous présumons que le dépouillement des données originales du courantmètre a été fait correctement: on a vérifié la calibration, les temps initiaux et finaux, le taux d'échantillonnage et ses fluctuations dans le temps, les erreurs grossières de lectures etc. Ce dépouillement doit se faire immédiatement après la récupération des instruments et non pas des mois après, lorsqu'on a perdu effectivement le souvenir des détails de la performance de l'instrument.

Ces données brutes, mais soigneusement vérifiées, sont alors lissées et décimées à intervalles d'une heure, du moins dans le genre d'analyse que nous contemplons. En certaines circonstances, il faut analyser les données brutes elles-mêmes mais dans ce cas on doit se restreindre exclusivement à des calculs de spectres de puissance, le but de ces études spécialisées étant tout

au plus l'étude du comportement de l'instrument plutôt que celle des renseignements qu'il a recueillis. Dans ce qui suit, nous ne traiterons que des données lissées et décimées à intervalles d'une heure. L'expression (5) prend alors la forme:

$$\{\underline{w}(t)\} = \{u(t), v(t)\} \quad t = -T/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, T/2$$

où l'intervalle de temps $\Delta t = 1$ heure (nous supposons que le nombre total d'heures d'observations est toujours impair). La mesure du temps se fait à partir d'un temps de référence central qui est donné explicitement dans les analyses.

Il nous reste maintenant à faire face au travail de présentation des données de courant. Celles-ci étant un ensemble de vecteurs dont la position varie avec le temps à différents points de la section, il n'est pas du tout facile de les inspecter en un coup d'oeil. Parmi le nombre infini de représentations possibles, nous pouvons noter les choix suivants:

1) Vecteur progressif. On additionne vectoriellement les courants observés en un point, du commencement à la fin des observations. L'avantage de ce type de présentation est qu'il indique très clairement l'existence ou l'absence d'un courant moyen. Si celui-ci existe, le vecteur progressif a l'allure d'une droite irrégulière et sa longueur divisée par le temps donne un bon estimé de ce courant moyen. Si celui-ci fluctue appréciablement, le vecteur progressif a l'apparence d'une droite brisée dont chaque section peut être utilisée pour calculer l'intensité et l'orientation de ce courant durant chaque intervalle. Les courants de marée se manifestent par des boucles dans le vecteur progressif; si elles tournent à gauche, les courants de marée tournent à gauche et ainsi de suite. La grandeur des boucles indique l'intensité relative des courants de marées par rapport au courant moyen. Les courants de marées alternatifs se révèlent par des hésitations périodiques du vecteur progressif à avancer dans la direction du courant moyen. Le désavantage du vecteur progressif est qu'il donne seulement des indications très vagues sur la contribution des courants de marée; de plus il est difficile de le superposer sur d'autres vecteurs progressifs observés à d'autres points car ils ont tendances à s'entremêler.

2) Histogrammes. On peut construire des histogrammes sur les orientations et les intensités des courants observés. Ces diagrammes ne révèlent qu'une faible fraction de l'information recueillie et ne facilitent en rien le travail d'interprétation des analyses.

3) Graphiques des composantes est et nord. J'ai utilisé cette présentation dans l'analyse harmonique des courants mais je sépare le courant moyen de la composante due au courant de marée. De cette façon on peut suivre le courant moyen et se faire une idée de son orientation et de sa stabilité dans le temps. L'importance relative des courants de marée est mise en évidence mais il est difficile de déduire en un coup d'oeil le sens de rotation des courants.

4) Roses des courants sur des intervalles de 12 heures. On peut mettre la rose des courants observés sur un intervalle de 12 heures en regard du niveau d'eau à une station côtière avoisinante et en regard de l'orientation prédominante du lit de la section. Les figures 5 à 9 dans la partie B de ce travail donnent des exemples d'une telle présentation: il est possible de cette façon de suivre l'évolution du courant à divers niveaux ou à une même

profondeur à différents points de la section. On utilise des intervalles de 12 heures puisqu'ils permettent d'élaborer des roses de courant à peu près fermées.

On peut à l'aide de cette présentation voir en un coup d'oeil une masse d'information qui autrement aurait dû être dispersée dans une masse de diagrammes distincts. On peut inspecter la figure 5 de la partie B pour se rendre compte de la puissance de ce genre de représentation et l'aide qu'elle peut apporter au contrôle et à l'interprétation des analyses. Une inspection attentive de cette figure nous indique les faits suivants:

a) Le courant moyen est variable à tous les niveaux excepté à 75 mètres. Là il a une orientation de l'ordre de 230° et une intensité de quelques 10 à 15 cm/sec. Le courant moyen a une certaine intensité à 50 mètres mais il est plus variable. Quand il existe il a une intensité de quelques 10 cm/sec (par conséquent sa valeur moyenne sera moindre) et son orientation est aussi de l'ordre de 230° .

b) Les courants de marées sont rotatoires entre 2 et 20 mètres et tournent à gauche. Le courant à 50 mètres tend plus à être rectiligne mais tourne encore à gauche. Le courant à 75 mètres tourne à droite et sa rose est fortement elliptique.

c) Une forte inégalité diurne prévaut dans le courants qui n'est pas réfléchié aussi fortement dans le niveau à Alert; donc le quotient des composantes diurnes sur les composantes semidiurnes doit être plus grand pour les courants que pour Alert.

d) L'orientation du demi-grand axe du courant de marée tend à tourner à droite alors que la profondeur augmente: son orientation devrait varier entre 260 et 230° entre 2 et 75 mètres.

e) Les phases des courants de marée diminuent avec la profondeur: par exemple si le courant maximum prend place à l'heure 4 à 2 mètres, ce même courant maximum prendra place plus près de l'heure 3 à 75 mètres.

f) Les courants de marée maximaux précèdent la haute mer à Alert; par conséquent la phase des courants de marée devra tomber avant celle d'Alert.

Une fois que l'on a fait ce diagnostic préliminaire, on procède aux analyses harmoniques et aux spectres croisés avec la station côtière et on vérifie immédiatement leurs résultats en utilisant le diagnostic préliminaire. Dans le cas qui nous occupe, nous allons aux Tableaux 7 et 8 de la section B et nous vérifions si nos conclusions préliminaires ont été supportées par les analyses. Nous voyons que:

a) Dans le Tableau 8 pour la station 2 de Chow, le courant moyen à 75 mètres a une intensité de 11 cm/sec et il a une orientation de 235° . Le courant moyen à 50 mètres a une intensité de quelques 6 cm/sec et une orientation de 239° . Le courant moyen dans les niveaux supérieures diminue graduellement et son orientation devient plus variable.

b) Le demi-petit axe de M_2 forme une fraction appréciable du demi-grand axe jusqu'à 50 mètres; donc une indication que le courant est rotatoire. A 50 mètres le quotient est faible et par conséquent le courant tend à être rectilinéaire. A 75 mètres, le demi-petit axe de M_2 devient encore une fois important par rapport au demi-grand axe. Donc le courant est rotatoire, mais cette fois-ci, à droite, plutôt qu'à gauche comme aux niveaux précédents.

c) Le quotient de K_1 à M_2 dans les analyses va de .23 à .43 pour la station 2 de Chow, alors qu'à Alert, il était de .23.

d) L'orientation du demi-grand axe de M_2 va de 259° à 2 mètres à 229° à 75 mètres.

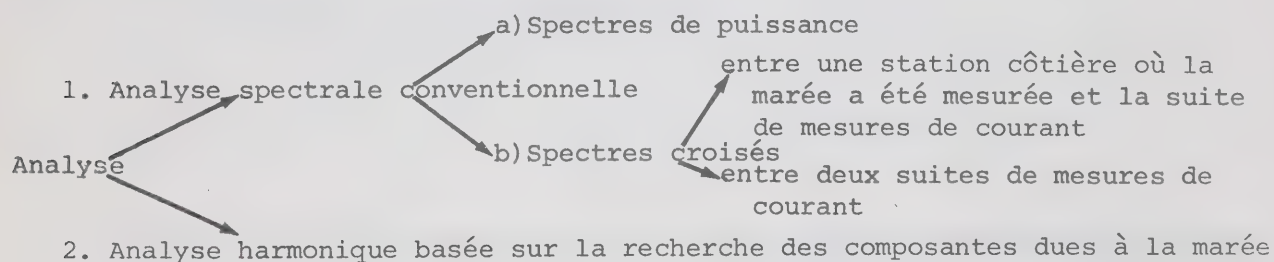
e) La phase de M_2 va de 37° à 2 mètres à 13° à 75 mètres.

f) La phase de Greenwich à Alert pour M_2 est 65° .

Nous vérifions donc que les conclusions préliminaires obtenues par l'inspection des données de courant sont rigoureusement supportées par les analyses. Ce travail initial d'inspection est essentiel puisqu'il nous aide à nous familiariser avec le contenu informatique des données de courant, il nous prépare aux réponses qui seront fournies par l'analyse et ce qui est plus important, nous aide à vérifier ces analyses. Si il y a quelque contradiction que ce soit entre les conclusions préliminaires et les résultats des analyses, il y a erreur quelque part et il faut entreprendre de la rechercher et de la corriger avant qu'il ne soit trop tard.

3.6 Les étapes de l'analyse

Puisque les données de courant contiennent un des paramètres océanographiques les plus récalcitrants, il faut les attaquer de toutes les directions possibles, car il est presque impossible de dire à première vue si la suite à étudier est fausse ou encombrée d'erreurs ou si elle représente vraiment les déplacements au point échantillonné. Nous avons déjà fait une inspection des données lissées et décimées dans le temps; il nous faut maintenant nous attaquer à leur structure spectrale. La voie que nous allons suivre est la suivante:



L'ensemble de mesures que nous allons obtenir à la suite de ces analyses va être redondant en bonne partie mais cet excès d'information va être utilisé pour récupérer par recoupages successifs ce qui semble être les caractéristiques fondamentales des données recueillies.

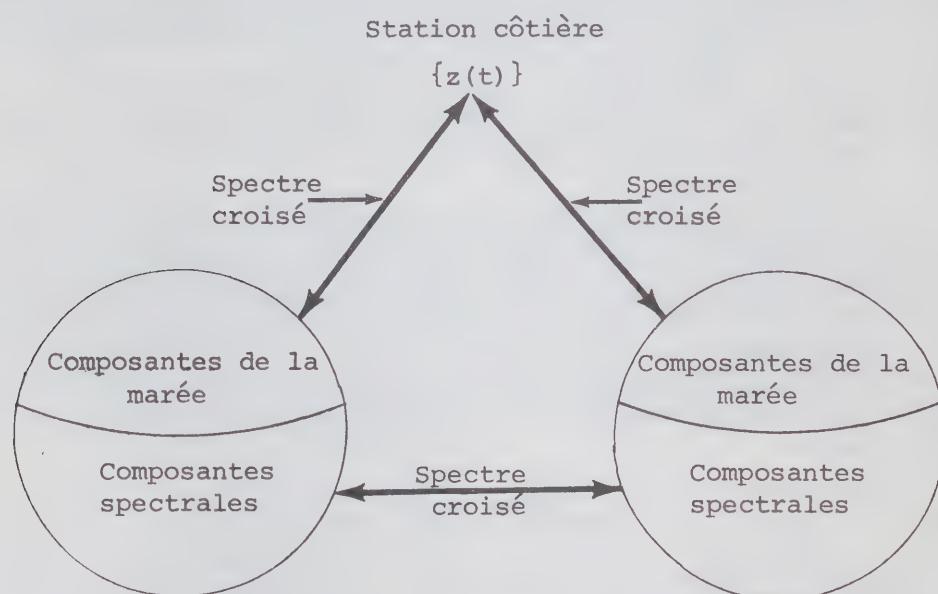
Le spectre de puissance donne une vue d'ensemble du contenu énergétique d'une suite de données de courant en un point donné sur toutes les fréquences ainsi que des indications très nettes sur la structure des ellipses composantes, leur orientation et leur sens de rotation.

L'analyse harmonique donne des renseignements plus précis sur les ondes composantes dues à la marée puisque c'est là que se trouve en général la partie la plus énergétique du spectre et donne en sus, la phase de Greenwich de ces ondes qui est un paramètre d'importance fondamentale. L'analyse

harmonique est souvent incapable de résoudre adéquatement les ondes de marée à cause du bruit ambiant intense; alors nous avons recours au spectre croisé entre une station côtière dont le spectre est connu et les données de courant pour obtenir une résolution plus fiable; le succès d'une telle résolution n'est pas toujours assuré.

Les spectres croisés entre deux suites de mesures de courant mesure leur degré de corrélation sur toutes les bandes de fréquences choisies; ils aident aussi à évaluer la corrélation totale entre ces deux suites.

Au cours de tous ces calculs, les comparaisons et les recoupements aideront à déceler des erreurs qui auraient pu échapper à l'inspection préliminaire. Nous montrons symboliquement dans la figure qui suit les relations logiques entre les différents types d'analyses:



Suites de données $\{\underline{w}_1(t)\}$
de courant

,

$\{\underline{w}_2(t)\}$

Le spectre de puissance de $\{\underline{w}_1(t)\}$ ou $\{\underline{w}_2(t)\}$ donne tout le contenu spectral renfermé dans le cercle donné, incluant la marée; le spectre croisé évalue la relation spectrale entre ces mêmes contenus. L'analyse harmonique directe donne un estimé des ondes composantes de la marée dans $\{\underline{w}_1(t)\}$ et $\{\underline{w}_2(t)\}$; le spectre croisé entre la station côtière et $\{\underline{w}_1(t)\}$ ou $\{\underline{w}_2(t)\}$ aide à raffermir la résolution de ces ondes composantes et révèle la partie du courant qui est cohérente avec la marée verticale.

3.6.1 La décomposition des observations de courant en composantes polarisées

Nous retournons maintenant à l'expression (5) pour attaquer le travail d'analyse. Toutes les opérations que nous allons effectuer sur $\{\underline{w}(t)\}$ sont linéaires et par conséquent se portent directement sur les composantes est et nord, $u(t)$ et $v(t)$. On peut toujours écrire celles-ci sous la forme:

$$u(t) = \sum_j a_j \cos(\sigma_j t - \gamma_j) + \varepsilon_j \quad (6)$$

$$v(t) = \sum_j b_j \cos(\sigma_j t - \beta_j) + \delta_j \quad (7)$$

qui décrit soit une représentation de Fourier, soit une superposition d'ondes de marée. Dans ces cas:

Représentation de Fourier	Ondes composantes de la marée
$\sigma_j \equiv 2\pi j/T$	$\sigma_j \equiv$ la fréquence d'une onde composante de la marée
$j = 0, 1, 2, \dots, T_0/2$	$j = 0, 1, 2, \dots, N$
où T_0 est un nombre entier (sans dimensions) égal en valeur absolue à T , le nombre d'heures d'observations	où N est le nombre de composantes recherchées
$(a_j, \gamma_j), (b_j, \beta_j)$ sont évalués sur les fréquences	
$\sigma = \begin{matrix} . & . & . & . & . \\ 0 & 2\pi/T & & & \pi \end{matrix}$	$\sigma = \begin{matrix} . & . & . & . & . & . \\ 0_1 & K_1 & P_1 & N_2 & M_2 & S_2 \end{matrix} \text{ etc}$

ε_j et δ_j sont les composantes est et nord du bruit ambiant et nous les sous-entendrons dans tous les calculs qui vont suivre. Nous supposons que \underline{w} est un vecteur à deux dimensions: dans ce cas nous pouvons l'écrire comme un nombre complexe

$$\underline{w} = u + iv \quad (8)$$

de telle sorte qu'en nous servant de (6) et (7) ainsi que de la représentation d'Euler pour les cosinus, nous pouvons écrire \underline{w} sous la forme:

$$\underline{w}(t) = \sum_{j=-R}^R \underline{w}_j e^{i\sigma_j t} \quad (9)$$

où nous avons défini:

$$\sigma_{-j} \equiv -\sigma_j$$

$$\underline{w}_j \equiv \frac{1}{2} (a_j e^{-i\gamma_j} + i b_j e^{-i\beta_j})$$

$$\underline{w}_{-j} \equiv \frac{1}{2} (a_j e^{i\gamma_j} + i b_j e^{i\beta_j})$$

et

$R \equiv T_0/2$ dans la représentation de Fourier, $R \equiv N$ dans la représentation harmonique.

Si nous regardons l'expression (9) de plus près nous notons que le courant $\underline{w}(t)$ a été décomposé en deux types de vecteurs distincts:

a) \underline{w}_{-j} pour les fréquences négatives σ_{-j} , est un vecteur qui tourne à droite et \underline{w}_{-j} complète une révolution sur un intervalle de temps donné par $T_j = 2\pi/\sigma_j$.

b) \underline{w}_j est un vecteur qui tourne à gauche.

Nous avons donc représenté le courant par une superposition de vecteurs polarisés à droite et à gauche; nous notons que \underline{w}_j et \underline{w}_{-j} ont des valeurs complètement indépendantes.

3.6.2 L'ellipse composante

Le terme correspondant à une fréquence σ_j dans (9) est

$$\underline{w}_j e^{i\sigma_j t} + \underline{w}_{-j} e^{-i\sigma_j t} \quad (10)$$

Au cours de la période $2\pi/\sigma_j$, les vecteurs \underline{w}_j et \underline{w}_{-j} seront soit en juxtaposition, soit en opposition en deux occasions et ces événements seront séparés par $\frac{1}{2}$ période. Les distances extrêmes du vecteur (10) à partir de l'origine seront donc:

$$M_j = |\underline{w}_j| + |\underline{w}_{-j}| \quad (11)$$

$$m_j = |\underline{w}_j| - |\underline{w}_{-j}| \quad (12)$$

et le lecteur peut vérifier que le vecteur (10) trace une ellipse au cours de cet intervalle dont le demi-grand axe et le demi-petit axe seront M_j et m_j . Si nous définissons \underline{w}_j et \underline{w}_{-j} par:

$$\underline{w}_j \equiv |\underline{w}_j| e^{i\alpha_j}$$

$$\underline{w}_{-j} \equiv |\underline{w}_{-j}| e^{i\alpha_{-j}}$$

l'inclinaison du demi-grand axe sera donnée par:

$$\theta_j = \frac{1}{2} (\alpha_j + \alpha_{-j}) \quad (13)$$

et le temps quand le vecteur (10) pointe vers le demi-grand axe est:

$$t_j = \frac{1}{2} (\alpha_{-j} - \alpha_j) / \sigma_j \quad (14)$$

Puisque m_j est la différence de deux quantités dans (12), il peut arriver qu'il soit négatif aussi bien que positif. Si $m_j < 0$, c'est une indication que le vecteur (10) tourne à droite (i.e. la composante polarisée à droite est plus forte que celle polarisée à gauche) et vice versa.

Cette ellipse individuelle qui correspond à chaque fréquence σ_j du spectre de la suite $\{\underline{w}(t)\}$ s'appelle l'ellipse composante. Ses éléments sont les caractéristiques du spectre de $\{\underline{w}(t)\}$ à la fréquence σ_j , soient:

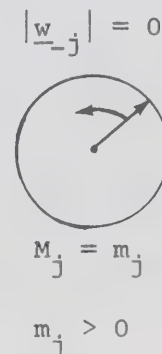
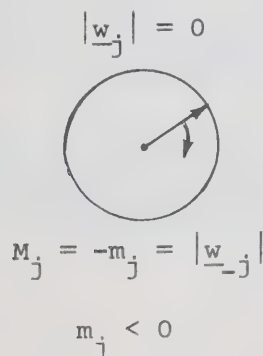
- a) le demi-grand axe de l'ellipse composante; M_j
- b) son demi-petit axe; m_j ,
- c) l'inclinaison du demi-grand axe; θ_j ,
- d) le temps t_j (ou la phase $\sigma_j t_j$) quand la composante spectrale est à son maximum et
- e) le sens de rotation de la composante spectrale à cette fréquence qui est indiqué par le signe de m_j .

Note: Il existe une ambiguïté dans la représentation des éléments de l'ellipse: nous aurions pu aussi bien la représenter par des éléments déplacés par 180° . Ceci peut causer certains problèmes au cours de l'interprétation des résultats d'une analyse. On peut soumettre ces résultats à une transformation qui conserve l'ellipse dans un état d'invariance: l'addition simultanée de 180° à θ_j et $\sigma_j t_j$ est une transformation qui n'affecte en rien l'ellipse composante. Ce qui veut dire que si l'on n'aime pas l'orientation ou la phase de l'ellipse analysée, on peut ajouter 180° à la phase et à l'orientation sans affecter l'ellipse.

3.6.2.1 Formes extrêmes de l'ellipse composante

- a) Il se peut que $|\underline{w}_j| = 0$ ou $|\underline{w}_{-j}| = 0$ (15)

L'équation (15) indique/que le spectre du courant à σ_j consiste d'une seule composante polarisée, soit à droite, soit à gauche. La figure qui en résulte sur un intervalle $T_j = 2\pi/\sigma_j$ est un cercle dont le rayon tourne à vitesse constante,



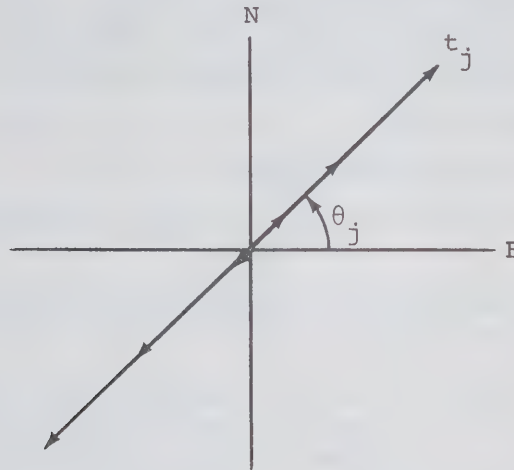
et θ_j , t_j n'ont aucune importance pratique.

b) Il se peut que

$$|\underline{w}_j| = |\underline{w}_{-j}| \quad (16)$$

$$\Rightarrow m_j = 0$$

L'ellipse composante dégénère en une droite et la composante spectrale est toujours orientée dans la même direction alors que son amplitude oscille entre $\pm M_j$ sur une période $2\pi/\sigma_j$.



L'égalité (16) ne spécifie rien sur les angles α_j , α_{-j} . Leurs valeurs déterminent l'orientation de la composante du courant et le temps quand elle atteint sa valeur maximum. Le sens de rotation n'existe pas dans le cas présent: la composante du courant est toujours dans la même direction et oscille entre des valeurs extrêmes positives et négatives.

3.6.3 Spectres de puissance

Ces spectres possèdent une stabilité statistique supérieure à celle des spectres de Fourier dont nous avons parlé jusqu'ici; on se sert de préférence de spectres de puissance en pratique. On peut évaluer tous les éléments de l'ellipse composante avec leur aide à l'exception de la phase. La phase évidemment n'a aucun sens pour les suites stochastiques mais elle est d'importance fondamentale dans les oscillations dues à la marée. C'est pourquoi nous devons nous tourner éventuellement vers l'analyse harmonique quand nous voulons étudier la marée de plus près.

Un spectre de puissance se porte sur le carré de l'amplitude spectrale. Un carré est créé par une opération de produit; dans le cas d'une quantité vectorielle, il y a deux opérations de multiplication possibles:

a) le produit scalaire de la forme:

$$\underline{a} \cdot \underline{b}$$

b) le produit vectorel de la forme:

$$\underline{a} \times \underline{b}$$

La généralisation algébrique dans l'expression (9) de ces produits scalaire et vectoriel pour le cas du produit d'un vecteur par lui-même est:

$$\frac{1}{T_0} \sum_{-T_0/2}^{T_0/2} (\underline{w}_j^* e^{-i\sigma_j t} + \underline{w}_{-j}^* e^{-i\sigma_{-j} t}) (\underline{w}_j e^{i\sigma_j t} + \underline{w}_{-j} e^{i\sigma_{-j} t}) \rightarrow \underline{w}_j^* \underline{w}_j + \underline{w}_{-j}^* \underline{w}_{-j} \quad (17)$$

$$\frac{1}{T_0} \sum_{-T_0/2}^{T_0/2} (\underline{w}_j e^{i\sigma_j t} + \underline{w}_{-j} e^{i\sigma_{-j} t})^2 \rightarrow 2 \underline{w}_j \underline{w}_{-j} \quad (18)$$

(17) est un spectre de puissance qui équivaut exactement au carré d'une quantité scalaire: il mesure l'énergie cinétique dans chaque bande de fréquence σ_j . Nous notons que

$$\underline{w}_j \neq \underline{w}_{-j}$$

comme nous l'avons déjà mentionné, de telle sorte que le spectre de puissance à σ_j peut différer de celui à $-\sigma_j$; ceci indique tout simplement que nous évaluons individuellement les contributions à l'énergie cinétique des composantes polarisées à gauche et à droite. Nous avons donc les spectres de puissance:

$$S_{-j} = \underline{w}_{-j}^* \underline{w}_{-j} \quad (19)$$

$$S_{+j} = \underline{w}_j^* \underline{w}_j \quad (20)$$

et pour une fréquence σ_j donnée, la puissance totale

$$S_j^t = S_{-j} + S_j \quad (21)$$

Nous remarquons que S_{-j} et S_j sont des quantités intrinsèquement positives. D'autre part (18) est l'expression pour le spectre vectoriel $\underline{Y}(j)$ qui lui, satisfait à la propriété de symétrie:

$$\underline{Y}(-j) = \underline{Y}(j)$$

3.6.3.1 La reconstitution des éléments de l'ellipse composante à l'aide des spectres de puissance

Nous nous rappelons que les éléments de cette ellipse étaient M_j , m_j , θ_j et le sens de rotation (nous ne pouvons plus parler de la phase $t_j^j \sigma_j$). Nous notons aussi que l'aire de l'ellipse est

$$A_j = \pi M_j m_j$$

qui naturellement est 0 lorsque $m_j = 0$, ce qui arrive lorsque la composante est rectiligne. D'autre part, la distance entre les foyers de l'ellipse est

$$c_j = \sqrt{M_j^2 - m_j^2}$$

$c = 0$ quand $M_j = m_j$: les foyers se confondent en un seul point qui est le centre d'un cercle. Nous pouvons maintenant exprimer les éléments de l'ellipse composante à l'aide des spectres de puissance:

$$M_j = S_j^{\frac{1}{2}} + S_{-j}^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$m_j = S_j^{\frac{1}{2}} - S_{-j}^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$\theta_j = \frac{1}{2} (\alpha_j + \alpha_{-j}) = \frac{1}{2} \arctg \frac{\operatorname{Im} (\underline{w}_j \underline{w}_{-j})}{\operatorname{Re} (\underline{w}_j \underline{w}_{-j})} = \frac{1}{2} \arctg \frac{\operatorname{Im} (\underline{Y}(j))}{\operatorname{Re} (\underline{Y}(j))} \quad (24)$$

Le sens de rotation est défini par le signe de m_j dans (23); nous pouvons par conséquent définir le coefficient de rotation:

$$R_j \equiv \frac{S_j - S_{-j}}{S_j} \quad (25)$$

A cause de sa définition R_j satisfait:

$$-1 \leq R_j \leq 1 \quad (26)$$

Nous voyons par conséquent que:

- a) si $R_j = -1$, l'ellipse composante est un cercle avec rotation à droite,
- b) si $R_j = 1$, l'ellipse composante est un cercle avec rotation gauche et
- c) si $R_j = 0$, la composante est rectiligne.

Nous remarquons que

$$A_j = \pi (S_j - S_{-j})$$

$$c_j = \sqrt{M_j^2 - m_j^2} = 2 |\underline{w}_j| |\underline{w}_{-j}|$$

La contrepartie du coefficient de rotation est le coefficient de stabilité

$$s_j \equiv \frac{|\underline{w}_j \underline{w}_{-j}|}{|\underline{w}_j| |\underline{w}_{-j}|} = \frac{|\underline{Y}(j)|}{S_j^{\frac{1}{2}} S_{-j}^{\frac{1}{2}}} \quad (27)$$

pourvu que $S_j \neq 0$ et $S_{-j} \neq 0$. Nous voyons que

$$0 \leq s_j \leq 1 \quad (28)$$

pourvu que la condition sur S_j et S_{-j} soit satisfaite. s_j mesure la tendance de la composante spectrale à j pointer dans la même direction: i.e. si $s_j = 1$, le courant est rectiligne; si le courant est rotatoire, S_j ou $S_{-j} = 0$, de telle sorte que ce coefficient de stabilité devient indéfini. Il n'y a pas de telle restriction sur R_j qui est toujours défini.

3.6.3.2 Les spectres croisés

Nous devons calculer deux types de spectres croisés:

- 1) celui entre le niveau d'eau observé à une station côtière et une suite de données de courant et
- 2) celui entre deux suites de données de courant.

3.6.3.2.1 La marée et le courant

Il nous faut référer au diagramme logique de la page 16 pour voir quel est le but de ce calcul. Le niveau d'eau observé à une station côtière contient en général une forte contribution due à la marée; il suffit d'une suite d'observations de l'ordre d'une année pour obtenir une idée assez juste de la structure des composantes de la marée à cet endroit. D'autre part les observations de courant durent à peine quelques mois et sont encombrées de bruit: il est donc infiniment plus difficile d'en extraire des valeurs fiables pour les composantes de la marée. Celle-ci est un phénomène dont la longueur d'onde est de l'ordre de centaines de kilomètres et qui affecte la masse d'eau toute entière; il doit donc y avoir une relation certaine entre la marée côtière et la composante de la marée dans les courants observés. Ceci ne veut pas dire que le spectre de la marée est identique dans les deux séries, mais la structure du spectre, du moins en dedans des bandes diurnes et semidiurnes, qui sont très étroites, doivent se ressembler d'assez près. Il n'y a pas de doute que le courant est animé en plus de mouvements additionnels qui peuvent être dus à la marée interne, aux mouvements d'inertie, etc., mais nous pouvons au moins extraire par spectre croisé, la partie du mouvement de courant qui est cohérente avec la marée côtière.

La mécanique de tels calculs est très simple en elle-même. Nous recherchons une suite d'observations à la station côtière qui est simultanée (ou quasi simultanée) avec les observations de courant: cette suite a la forme:

$$\{z(t)\}$$

(Les données d'une jauge submergée pourrait jouer le même rôle si elles sont prolongées au point d'obtenir une bonne résolution). Les données sur le courant sont utilisées sous leur forme (5), soit en composantes est et nord:

$$\{\underline{w}(t)\} = \{u(t), v(t)\}$$

et on calcule individuellement les spectres croisés entre z et u , z et v , soient ZU et ZV . Les cohérences et les admittances dans les directions est et nord sont alors:

$$C_x \equiv \frac{|ZU|}{\sqrt{|Z| |U|}} \quad \underline{A} \equiv \frac{ZU}{|Z|} \equiv (A, a) \quad (29)$$

$$C_y \equiv \frac{|ZV|}{\sqrt{|Z| |V|}} \quad \underline{B} \equiv \frac{ZV}{|Z|} \equiv (B, b) \quad (30)$$

où nous dénotons par la majuscule, l'amplitude de l'admittance et par la minuscule, sa phase. Z , U et V sont les spectres de puissance des suites $\{z(t)\}$, $\{u(t)\}$ et $\{v(t)\}$.

Les cohérences ne sont pas des quantités invariantes car elles dépendent du choix des coordonnées, mais de toute façon, elles devraient être fortes; si elles sont faibles dans les deux directions, il y a indication que les données de courant sont erronées ou qu'elles ont été prises en un point d'échantillonnage fautif. Si tel est le cas, on ne va pas plus loin dans ce genre de calcul. La suite des données de courant est soit abandonnée, soit étudiée de plus près pour voir ce qui cause ce comportement étrange. D'habitude la cohérence est forte ($\sim .9$), dans l'une ou dans les deux directions; dans ce cas on peut se servir des admittances (29) et (30).

En pratique, je ne me sers que des admittances dans les bandes diurne et semidiurne (bien que je les évalue dans les autres bandes pour voir ce qui se passe) pour suppléer à l'analyse harmonique directe des courants, qui faillit souvent à séparer adéquatement les ondes composantes en dedans de ces bandes. Je dois supposer que l'admittance est une constante pour chaque bande.

La déduction des ondes composantes du courant se fait par simple transfert du spectre de la station côtière à l'aide de l'admittance calculée. Par exemple, si nous voulons calculer la j ème composante du courant, celle-ci sera donnée par:

$$x_j = A_j C_j \cos (\sigma_j t - (a_j + c_j)) \quad (31)$$

$$y_j = B_j C_j \cos (\sigma_j t - (b_j + c_j)) \quad (32)$$

si l'amplitude et la phase de l'onde à la station côtière est égale à (C_j, c_j) . Nous comprimons les expressions (31) et (32) sous la forme:

$$x_j = P_j \cos p_j \cos \sigma_j t + P_j \sin p_j \sin \sigma_j t$$

$$y_j = N_j \cos n_j \cos \sigma_j t + N_j \sin n_j \sin \sigma_j t$$

où nous avons défini:

$$P_j \equiv A_j C_j \quad p_j \equiv a_j + c_j \quad N_j \equiv B_j C_j \quad n_j \equiv b_j + c_j$$

Après un peu d'algèbre nous trouvons que:

$$\underline{w}_j = \sqrt{(N_j \cos n_j + P_j \sin p_j)^2 + (P_j \cos p_j - N_j \sin n_j)^2} \exp i \arctg \left(\frac{P_j \cos p_j - N_j \sin n_j}{N_j \cos n_j + P_j \sin p_j} \right) \quad (33)$$

$$\underline{w}_{-j} = \sqrt{(N_j \cos n_j - P_j \sin p_j)^2 + (P_j \cos p_j + N_j \sin n_j)^2} \exp i \arctg \left(\frac{P_j \cos p_j + N_j \sin n_j}{N_j \cos n_j - P_j \sin p_j} \right) \quad (34)$$

dont on peut déduire les éléments de l'ellipse composante, soient:

$$M_j, m_j, \theta_j, \sigma_j t_j$$

à l'aide des formules (11), (12), (13) et (14).

Cette résolution des composantes diurne et semidiurne de la marée dans les observations de courant à l'aide d'une station côtière est très importante en pratique car elle nous permet de vérifier les analyses directes des courants; elle aide aussi à résoudre certaines ondes qui autrement resteraient enfouies dans le bruit ambiant. Finalement ces calculs d'admittance aident à vérifier la qualité des observations de courant elles-mêmes qui, comme je l'ai déjà dit, sont très souvent entachées d'erreurs.

3.6.3.2.2 Courant contre courant

Encore une fois, la mathématique existe pour calculer le spectre croisé entre deux suites de données de courant (simultanées ou presque), disons entre les suites:

$$\{\underline{w}_1(t)\} \quad \text{et} \quad \{\underline{w}_2(t)\}$$

Mais nous devons d'abord nous demander ce que nous avons à gagner par un tel calcul. Les analyses harmoniques et spectrales forment une première étape qui aide à déchiffrer ce que chaque suite de données de courant contient en fait d'information tangible et fiable. Mais ce qui peut sembler encore plus décourageant à ce stage est que des suite d'observations sur un même amarrage ou à un même niveau peuvent se ressembler très peu. Les spectres croisés

sont disponibles à ce point pour évaluer quantitativement le degré de parenté (ou d'étrangeté) de ces données.

Ces spectres croisés sont calculés entre deux suites vectorielles et on peut retrouver leur définition en retournant aux formules (17) et (18) mais où cette fois, les produits scalaire et vectoriel sont calculés entre les suites 1 et 2, plutôt qu'avec la même suite. Nous avons donc les spectres croisés scalaire et vectoriel qui sont définis par:

$$\underline{s}_{12}(j) = \underline{w}_{1j}^* \underline{w}_{2j} \quad (35)$$

$$\underline{y}_{12}(j) = \underline{w}_{1,-j} \underline{w}_{2j} \quad (36)$$

Nous notons cette fois-ci que le spectre croisé scalaire est lui-même une quantité vectorielle. Quand nous calculons des spectres croisés, les quantités qui en découlent sont la cohérence et l'admittance tout comme (29) et (30). Nous obtiendrons donc:

a) pour le spectre scalaire:

b) pour le spectre vectoriel:

La cohérence scalaire:

La cohérence vectorielle:

$$\delta_{12}(j) = \frac{|\underline{s}_{12}(j)|}{\sqrt{s_1(j) s_2(j)}} \quad (37)$$

$$\Delta_{12}(j) = \frac{|\underline{y}_{12}(j)|}{\sqrt{s_1(-j) s_2(j)}} \quad (38)$$

L'admittance scalaire:

L'admittance vectorielle:

$$\xi_{12}(j) = \frac{\underline{s}_{12}(j)}{|s_1(j)|} \quad (39)$$

$$\underline{\Xi}_{12}(j) = \frac{\underline{y}_{12}(j)}{|s_1(-j)|} \quad (40)$$

Les définitions (38) et (40) dépendent de notre définition du spectre vectoriel (36); il faut les respecter soigneusement parce qu'autrement on obtiendrait une cohérence vectorielle qui pourrait être plus grande que 1. De plus il ne faut pas oublier que ces quantités diffèrent entre les fréquences négatives et positives; c'est à dire que les vecteurs polarisés à gauche ne se comportent pas comme ceux qui sont polarisés à droite puisque $\underline{w}_j \neq \underline{w}_{-j}$. Les calculs du spectre croisé entre deux suites de données de courant nous donnera donc l'ensemble de valeurs suivants:

Spectre croisé scalaire					Spectre croisé vectoriel				
Bande		Cohérence		Admittance	Cohérence		Admittance		
j		Fréquences		Fréquences	Fréquences		Fréquences		
		négatives	positives	négatives positives	négatives	positives	négatives	positives	
.
.

Les cohérences doivent tomber entre 0 et 1; il est préférable d'exprimer les admittances en amplitude et phase plutôt qu'en parties réelle et imaginaire.

Le spectre croisé donne 12 constantes distinctes pour chaque bande de fréquence: il faut donc apprendre à interpréter ces quantités en termes des données de courant. Si nous retournons aux formules (35) et (36), nous nous rendons compte que le spectre croisé scalaire relie les composantes des suites 1 et 2 polarisées dans la même direction. D'autre part, (36) indique que le spectre croisé vectoriel calcule la relation entre les composantes polarisées à droite de la suite 1 avec celles polarisées à gauche de 2, pour les fréquences positives ($\leftrightarrow j > 0$) et vice versa pour les fréquences négatives ($\leftrightarrow j < 0$).

Les spectres croisés peuvent aider à visualiser la transformation interne des courants d'un point à un autre; il faut toutefois prendre bien soin de noter que lorsque les énergies sont faibles, les limites de confiance des admittances sont très grandes et l'interprétation des valeurs calculées pour ces énergies peut être ambiguë et même impossible. Ceci ne veut pas dire toutefois qu'on devrait négliger systématiquement de calculer les spectres croisés, mais il faut limiter ces calculs aux paires de points dont l'intérêt est évident et l'interprétation des résultats doit être supportée par des principes physiques valables.

3.6.3.2.3 La corrélation totale

La corrélation totale entre deux suites vectorielles est une extension à deux dimensions de la définition de la corrélation entre deux suites scalaires. Nous savons que celle-ci peut être représentée par le produit scalaire normalisé:

$$r = \frac{\underline{a} \cdot \underline{b}}{|\underline{a}| |\underline{b}|} \quad (41)$$

Si nous retournons à la formule (17), nous voyons que la généralisation à deux dimensions de (41) est, si nous notons l'orthogonalité des $(e^{i\sigma j t}, e^{-i\sigma j t})$,

$$\begin{aligned} r_{12}(j) &= \frac{|\underline{w}_{1j}^* \underline{w}_{2j} + \underline{w}_{1,-j}^* \underline{w}_{2,-j}|}{\sqrt{(|\underline{w}_{1j}|^2 + |\underline{w}_{1,-j}|^2)(|\underline{w}_{2j}|^2 + |\underline{w}_{2,-j}|^2)}} \\ &= \frac{|\underline{s}_{12}(j) + \underline{s}_{12}(-j)|}{\sqrt{(s_1(j) + s_1(-j))(s_2(j) + s_2(-j))}} \end{aligned} \quad (42)$$

qui, cette fois, est défini exclusivement pour $j > 0$. Nous notons que:

$$0 \leq r_{12}(j) \leq 1$$

et par conséquent $r_{12}(j)$ se comporte comme tout coefficient de corrélation bien défini. L'avantage du coefficient de corrélation totale entre deux suites de données de courant sur le spectre croisé est qu'il donne une seule

mesure pour chaque fréquence, comparée à 12 dans le cas précédent: l'interprétation de ce coefficient est donc plus facile. Il évite aussi la considération de la polarisation qui peut sembler un artifice mathématique pour certains.

3.6.4 L'analyse harmonique

L'analyse harmonique directe des données de courant est décrite dans mon mémoire (Godin 1967). Ce type d'analyse révèle la partie la plus énergétique du signal contenu dans les données, soit la marée, et donne en plus la valeur du courant moyen. Les graphiques qui accompagnent ce genre d'analyse permettent de suivre l'évolution de ce courant moyen dans le temps et permettent de juger en un coup d'oeil, la constance de ce type de courant. Les ondes de marée sont estimées à l'aide des moindres carrés et comme je l'ai déjà dit, ces estimés peuvent être considérablement affectés par le bruit ambiant. Les résultats de l'analyse sont exprimés en termes des éléments de l'ellipse composante.

4. DETAILS SUPPLEMENTAIRES

4.1 Formules pratiques pour le calcul des spectres de puissance et des spectres croisés

Les formules que nous avons données jusqu'ici pour ce type de spectre sont purement symboliques: il nous faut maintenant les exprimer en termes des composantes u et v des courants observés puisque cette paire de nombres forme la base véritable de notre source d'information. Nous allons dériver ces formules en supposant que les spectres sont dérivés des covariances bien que nous sachions qu'en pratique, on calcule ces spectres directement.

L'autocovariance d'une variable $u(t)$ est la moyenne du produit déphasé $u(t) u(t+\tau)$ sur l'intervalle d'observations. Nous la dénotons par:

$$\overline{u(t) u(t+\tau)} \quad \text{ou} \quad \overline{u_t u_{t+\tau}}$$

Le spectre de puissance sera alors obtenu par le calcul de

$$\int_{-T/2}^{T/2} \overline{u(t) u(t+\tau)} e^{-i\sigma\tau} d\tau \quad \text{pour} \quad -\sigma_f < \sigma < \sigma_f \quad (43)$$

En pratique nous devons calculer (43) à l'aide de quantités réelles de la forme:

$$\int_0^{T/2} \overline{u(t) u(t+\tau)} \cos \sigma_j \tau d\tau \quad (44)$$

La notation conventionnelle pour (44) est $\frac{1}{2} C_{uu}(\sigma_j)$ puisque le spectre de puissance de la quantité u a pour expression:

$$C_{uu}(\sigma_j) = \int_{-T/2}^{T/2} \overline{u(t) u(t+\tau)} e^{-i\sigma\tau} d\tau = 2 \int_0^{T/2} \overline{u(t) u(t+\tau)} \cos \sigma_j \tau d\tau$$

Si nous retournons aux formules (17) et (18), nous voyons que les spectres scalaire et vectoriel de la suite $\{\underline{w}(t)\}$ seront donnés par:

$$\begin{aligned}
S(\sigma_j) &= \int_{-T/2}^{T/2} \overline{w(t)} w(t+\tau) e^{-i\sigma_j \tau} d\tau \\
&= \int [\overline{u(t) u(t+\tau)} + \overline{v(t) v(t+\tau)} + i \overline{u(t) v(t+\tau)} - \overline{v(t) u(t+\tau)}] e^{-i\sigma_j \tau} d\tau \\
&= \frac{1}{2} C_{uu} + \frac{1}{2} C_{vv} + \frac{1}{2} i (C_{uv} - iQ_{uv}) - (C_{vu} - iQ_{vu}) \sigma = \sigma_j
\end{aligned}$$

Le spectre croisé des suites $\{u(t)\}$ et $\{v(t)\}$, $C_{uv} - iQ_{uv}$, satisfait aux propriétés de symétrie suivantes:

$$C_{vu}(\sigma) = C_{uv}(\sigma) \quad Q_{uv}(\sigma) = -Q_{vu}(\sigma) \quad Q_{uv}(-\sigma) = -Q_{uv}(\sigma) \quad C_{uv}(-\sigma) = C_{uv}(\sigma)$$

Par conséquent:

$$S(\sigma_j) = \frac{1}{2} C_{uu}(\sigma_j) + \frac{1}{2} C_{vv}(\sigma_j) + Q_{uv}(\sigma_j) \quad (45)$$

$$S(-\sigma_j) = \frac{1}{2} C_{uu}(\sigma_j) + \frac{1}{2} C_{vv}(\sigma_j) - Q_{uv}(\sigma_j) \quad (46)$$

De même

$$\underline{Y}(\sigma_j) = \int_{-T/2}^{T/2} \overline{\underline{w}(t)} \underline{w}(t+\tau) e^{-i\sigma_j \tau} d\tau = \frac{1}{2} (C_{uu}(\sigma_j) - C_{vv}(\sigma_j) + 2iC_{uv}(\sigma_j))$$

Nous aurons donc:

$$\underline{Y}(\sigma_j) = \underline{Y}(-\sigma_j) = \frac{1}{2} (C_{uu}(\sigma_j) - C_{vv}(\sigma_j) + 2iC_{uv}(\sigma_j)) \quad (47)$$

Si nous passons maintenant aux spectres de puissance de deux suites $\{\underline{w}_1(t)\}$ et $\{\underline{w}_2(t)\}$ il suffit de mettre des suffixes 1 et 2 dans l'autocovariance, soit

$$\overline{w_1^*(t) w_2(t+\tau)} \quad \text{pour le spectre scalaire,}$$

$$\overline{w_1(t) w_2(t+\tau)} \quad \text{pour le spectre vectoriel.}$$

Nous retrouverons alors les expressions:

$$S_{-12}(\sigma_j) = \frac{1}{2} (C_{u_1 u_2}(j) + C_{v_1 v_2}(j) + Q_{u_1 v_2}(j) - Q_{v_1 u_2}(j) + i(-Q_{u_1 u_2}(j) + Q_{v_1 v_2}(j)) + C_{u_1 v_2}(j) - C_{v_1 u_2}(j)) \quad (48)$$

$$\underline{Y}_{-12}(\sigma_j) = \frac{1}{2} (C_{u_1 u_2}(j) - C_{v_1 v_2}(j) + Q_{v_1 u_2}(j) + Q_{u_1 v_2}(j) + i(-Q_{u_1 u_2}(j) + Q_{v_1 v_2}(j) + C_{v_1 u_2}(j) + C_{u_1 v_2}(j))) \quad (49)$$

On se sert des propriétés de symétrie de C et Q pour $\pm \sigma$ pour évaluer les valeurs équivalentes de $S_{12}(-\sigma_j)$ et $Y_{12}(-\sigma_j)$.

Nous pouvons calculer explicitement à l'aide des formules (45) à (49) tous les paramètres qui ont été indiqués dans le texte.

4.2 Lissage et décimation

Les courants, à cause de leur grande variabilité, doivent être échantillonnés sur de courts intervalles de temps. Il est impossible de déterminer ce taux d'échantillonnage à l'avance: il est donc nécessaire en pratique de suréchantillonner, quitte à se débarrasser du surplus d'information après une inspection des données. En fait, on peut rarement se payer le luxe de rejeter quoi que ce soit après avoir inspecté un enregistrement de courant: il y a beaucoup trop d'irrégularités en général pour espacer l'échantillonnage.

J'ai trouvé plus simple en pratique de lisser les données à l'aide d'un opérateur lisseur et de les décimer par après à un intervalle d'une heure. On peut représenter le lissage par l'expression:

$$\mathcal{L} [\{ \underline{w}'(t) \}] \equiv \sum_{j=-k}^k \ell_j \underline{w}'(t_0 + j\epsilon) = \underline{w}(t_0) \quad \Delta t_0 = 1 \text{ heure}$$

\underline{w}' est la valeur suréchantillonnée de \underline{w} , ϵ est l'intervalle initial d'échantillonnage, t_0 est le temps sur lequel l'opérateur lisseur est centré, ℓ_j est la représentation temporaire de l'opérateur lisseur. Cet opérateur déforme le spectre de $\{ \underline{w}(t) \}$ en général, surtout sur les hautes fréquences; il faut corriger cette déformation. Il ne faut pas oublier toutefois que si on a un grand intérêt dans les hautes fréquences (ce qui est rare), il ne faut pas lisser et on doit se concentrer immédiatement sur le calcul des spectres de puissance de la suite originale $\{ \underline{w}'(t) \}$; en effet l'opérateur lisseur minimise l'effet des hautes fréquences et si on essaie de reconstruire celles-ci à partir du spectre lissé, on maximise l'erreur de leur estimation.

4.3 Le choix du nombre de bandes de fréquences

Puisque les données de courant contiennent beaucoup de bruit, les bandes doivent être aussi larges que possibles, mais d'autre part, il faut toujours être capable de résoudre la structure du spectre. Dans le cas qui nous occupe, j'ai trouvé pratique de calculer le spectre sur des bandes d'une largeur d'un cycle/jour: on peut séparer de cette façon l'effet des différentes espèces de marée. Puisque notre taux d'échantillonnage final est une lecture/heure, il s'ensuit que nous calculons le spectre sur douze bandes de fréquence, ce qui en général, suffit amplement pour extraire l'information que l'on peut vraiment sortir d'une suite de données de courant.

5. ILLUSTRATIONS

Nous illustrons maintenant à l'aide de quelques exemples numériques les techniques d'analyse que nous venons de décrire: nous nous servons principalement

de la station 182(100) de Sadler à cause de son grand intérêt intrinsèque (voir Section B).

Le Tableau 1 donne son spectre de puissance ainsi que les éléments de l'ellipse composante que l'on peut en déduire. La phase du spectre vectoriel et l'inclinaison de l'ellipse dépendent du choix du système de référence: on peut se rendre compte à quel point il est absurde d'utiliser un système de référence à orientation arbitraire puisque les angles obtenus ne peuvent être interprétés sans équivoque alors que si on se restreint à toujours employer un système est-nord, une telle équivoque n'existe jamais. Le Tableau 2 donne les résultats d'une analyse harmonique des mêmes données; les éléments de l'ellipse composante contiennent comme quatrième partie essentielle, la phase de Greenwich. Le Tableau 3 donne dans sa première partie les estimés de la cohérence et de l'admittance dans les directions X et Y choisies par Sadler entre le niveau d'eau à Alert et les données de courant à 185(100), pour deux résolutions différentes; les estimés de l'admittance sont presque identiques pour les deux résolutions. Nous notons la très faible cohérence dans la direction Y dans la bande diurne, qui est due au choix de coordonnées de Sadler. La deuxième partie du Tableau 3 montre le transfert des ondes de marées à Alert aux données de courant; ce transfert est basé sur la supposition que la structure interne du spectre en dedans des bandes diurnes et semidiurne est identique aux deux stations. C'est un fait que nous ne pouvons pas vérifier mais qui est plausible.

Il est intéressant de comparer les résultats pour les éléments de l'ellipse composante dans le Tableau 1 avec les résultats de l'analyse harmonique dans le Tableau 2 et avec les valeurs déduites à partir d'Alert dans le Tableau 3. Dans la bande semidiurne, le spectre de puissance nous donne pour les éléments de l'ellipse, $(33.0, -.9, 217^\circ, -)$; ceci correspond de près à la valeur de M_2 dans le Tableau 2, qui est $(31.2, -1.3, 217^\circ, 35.3^\circ)$ (nous avons ajouté 180° à θ et g dans le Tableau 2 pour M_2 , qui est une transformation qui n'affecte en rien l'ellipse composante), et ceux déduits d'Alert dans le Tableau 3, $(30.3, -.7, 217^\circ, 33.7^\circ)$. M_2 représente la valeur moyenne de la marée semidiurne et elle est presque parfaitement réfléchie dans la valeur du spectre de puissance dans la bande semidiurne.

Si nous portons maintenant notre attention vers la bande diurne, les trois sources des éléments de l'ellipse composante nous donnent $(14.1, -.5, 227^\circ, -)$ pour la bande diurne du spectre de puissance, $(10.8, -1.4, 230^\circ, 164.6^\circ)$ et $(8.5, .3, 227^\circ, 174.7^\circ)$ pour K_1 dans les deux autres techniques. Cette fois-ci, P_1 affecte K_1 dans l'analyse harmonique alors qu'on suppose qu'il a été éliminé quand K_1 a été déduit d'Alert. De toute façon, la valeur donnée par le spectre de puissance est définitivement plus forte que les deux autres; il semble donc que le spectre de puissance détecte dans la bande diurne, une certaine énergie qui provient d'une source autre que la marée.

Dans la bande de basse fréquence (0 à .0209 c/heure), on trouve une énergie très appréciable $(13.1, -2.5, 229^\circ, -)$, qui est due aux fluctuations du courant moyen. Nous ne connaissons pas l'origine de ces fluctuations mais leur énergie se compare à celle de la marée diurne. Il se peut qu'une partie de ces fluctuations soient dues à la transition du régime de marée de vive eau à morte eau qui a un cycle d'environ quinze jours; nous notons dans le Tableau 2, l'onde MS_f qui a la même période et dont les éléments sont $(5.9, -1.9, 219^\circ, 246.1^\circ)$ qui accomplirait pour une bonne moitié de ce type de

Tableau 1. Spectre de puissance et éléments de l'ellipse composante Station 182(100) de Sadler

Bande Fréquence		Spectre de puissance scalaire			Spectre vectoriel		Eléments de l'ellipse composante				Coefficient de Rotation Stabilité	
j	σ_j	s_{-j}	s_{+j}	s_j^t	\underline{y}_j	Im	M_j	m_j	θ_j^+	θ_j^{++}	R_j	s_j
	cycle/heure	(cm/sec) ² /(cycle/heure)			(cm/sec) ² /(cycle/heure)		cm/sec	cm/sec	degrés	degrés		
0	.0000	1445.7	672.8	2118.5	726.7	99.9	13.1	-2.5	3.9	228.9	-.3648	.7437
1	.0417	1284.5	1107.6	2392.1	813.1	56.2	14.1	-.5	2.0	227.0	-.0740	.6833
2	.0833	6895.2	6188.8	13083.9	5938.8	-1646.4	33.0	-.9	-7.7	217.3	-.0540	.9434
3	.1250	487.5	156.8	644.4	-115.8	74.3	7.1	-2.0	70.3	295.3	-.5132	.4240
4	.1667	288.8	61.6	350.4	-37.0	26.0	5.1	-1.9	72.5	297.5	-.6485	.3393
5	.2083	137.4	43.8	181.2	-32.8	-13.9	3.7	-1.0	-78.5	146.5	-.5168	.4599
6	.2500	86.4	59.5	145.9	10.0	-8.2	3.5	-.3	-19.6	205.4	-.1840	.1798
7	.2917	39.1	27.9	67.0	-13.6	5.3	2.4	-.2	79.3	304.3	-.1668	.4417
8	.3333	24.5	18.0	42.4	7.4	1.2	1.9	-.1	4.6	229.6	-.1528	.3574
9	.3750	23.1	10.0	33.0	-3.2	-2.1	1.6	-.3	-73.1	151.9	-.3973	.2489
10	.4167	12.1	5.9	18.0	0	-.0	1.2	-.2	-36.6	188.4	-.3462	.0041
11	.4583	6.6	7.2	13.8	-.5	-1.0	1.1	.0	-60.6	164.4	.0396	.1611
12	.5000	4.8	5.0	9.8++	-1.5	.1	.9	.0	87.7	312.7	.0257	.2997

+ dans le cadre de référence choisi par Sadler

++ dans le système trigonométrique

+++ l'énergie diminue avec les hautes fréquences à cause de l'emploi de l'opérateur lisseur

Tableau 2. Analyse harmonique directe⁺Courantomètre n^o. 182 à 100 mètres

Début des observations: 23.17 heures 23/4/72

Fin des observations: 21.17 heures 3/6/72

T = 983 heures T_O = 983

Onde	Fréquence	Eléments de l'ellipse composante					
j	σ_j cycle/heure	M _j cm/sec	m _j cm/sec	θ_j^{++} degrés	θ_j^{+++} degrés	g (phase de Greenwich) degrés	
0 Moyenne	.0000	42.2	0.0	359.6	224.6	0	
1 Mm	.0015	1.8	-.5	153.9	18.9	135.1	
2 MSf	.0028	5.9	-1.9	174.0	39.0	66.1	
3 2Q ₁	.0357	1.4	.4	41.9	266.9	334.0	
4 Q ₁	.0372	1.2	-.7	178.0	43.0	222.0	
5 O ₁	.0387	4.0	1.2	160.7	25.7	302.9	
6 NO ₁	.0403	1.9	-.1	101.9	326.9	85.5	
7 K ₁	.0418	10.8	-1.4	5.2	230.2	164.6	
8 J ₁	.0433	1.3	.5	43.0	268.0	202.5	
9 Mu ₂	.0777	2.5	.2	131.5	356.5	146.6	
10 N ₂	.0790	8.1	-.2	158.8	23.8	178.8	
11 M ₂	.0805	31.2	-1.3	172.0	37.0	215.3	
12 2MN ₂	.0820	1.7	.5	127.5	352.5	359.2	
13 S ₂	.0833	9.3	.7	176.7	41.7	259.9	
14 KJ ₂	.0851	1.4	-.7	165.3	30.3	330.9	
15 2SM ₂	.0862	1.8	-.1	75.2	300.2	124.7	
16 MO ₃	.1192	1.6	.3	119.7	344.7	320.9	
17 MK ₃	.1223	4.0	-2.0	57.5	282.5	290.2	
18 SK ₃	.1251	1.4	-.7	22.5	247.5	272.0	
19 MN ₄	.1600	1.3	-1.2	84.7	309.7	17.8	
20 M ₄	.1610	2.6	-.9	80.5	305.5	22.9	
21 MS ₄	.1638	2.0	-1.4	73.5	298.5	37.3	
22 2MN ₆	.2400	1.5	-.8	161.1	26.1	94.1	
23 M ₆	.2415	1.6	-.6	170.6	35.6	108.3	
24 2MS ₆	.2444	1.5	.2	169.8	34.8	164.5	
25 3MS ₈	.3249 ⁺⁺⁺⁺	1.0	.0	8.3	233.3	34.8	

+ seules les composantes dont le demi-grand axe est ≥ 1 cm/sec ont été retenues

++ orientation dans le système de coordonnées choisi par Sadler

+++ orientation dans un système conventionnel est-nord

++++ la distortion de l'opérateur lisseur a été corrigée dans le spectre donné

Tableau 3. Admittance entre Alert et la station 185(100) de Sadler

I

Début des observations à Alert: 23.00 heures 23/4/72
 Début des observations à la station de courant: 23.17 heures 23/4/72

Composante dans la direction	Résolution à 1 cycle/24 heures				Résolution à 1 cycle/200 heures			
	Bande	Fréquence cycle/heure	Cohérence	Admittance Phase Amplitude degrés (cm/sec)/ pieds	Bande	Fréquence cycle/heure	Cohérence	Admittance Phase Amplitude degrés (cm/sec)/ pieds
X (225°)	1	.0417	.9151	-115.4 54.3	1	.0450	.6113	- 99.6 84.7
						.0350	.0291	91.9 3.2
						.0400	.9740	-115.6 54.5
	2	.0833	.9780	111.0 42.1	2	.0850	.9843	127.2±7.9 35.4±.1
						.0900	.3259	103.4 17.8
Y (135°)	1	.0417	.0747	-136.8 1.9	1	.0450	.5168	48.8 57.0
						.0350	.2595	33.2 25.6
						.0400	.1685	-135.5 2.6
	2	.0833	.5931	- 64.7 5.6	2	.0850	.4244	-104.7 3.1
						.0900	.3977	- 19.9 22.4

II

Tableau 3. Transfert des ondes diurnes et semidiurnes d'Alert à la station 185(100) de Sadler

Ondes à Alert	Valeurs Transférées			Vecteur polarisé		Eléments de l'ellipse composante									
	C_j pieds	C_j degrés	P_j cm/sec	P_j degrés	N_j cm/sec	n_j degrés	à droite $ \underline{w}_{-j} $ cm/sec	α_{-j} degrés	à gauche $ \underline{w}_{+j} $ cm/sec	α_{+j} degrés	M_j cm/sec	m_j cm/sec	θ_j^+ degrés	θ_j^{++} degrés	g_j^{+++} degrés
O_1	.087	273.2									4.7	.2	1.6	226.6	160.1
K_1^{+++}	.155	287.6	8.45	172.0	.40	226.2	8.13	173.6	8.78	189.5	8.5	.3	1.6	226.6	174.7
P_1	.049	286.6									2.7	.1	1.6	226.6	173.5
M_2^{+++}	.687	280.0	30.07	28.6	4.27	218.6	31.00	20.8	29.63	323.2	30.3	-.7	352.0	217.0	33.7
N_2	.114	261.7									5.0	-.1	352.0	217.0	15.4
S_2	.333	324.4									14.7	-.4	352.0	217.0	78.3
K_2	.101	321.0									4.5	-.1	352.0	217.0	74.9

+orientation dans le système choisi par Sadler

++orientation dans un système conventionnel est-nord

+++la phase de Greenwich a été corrigée pour la différence de .17 heures qui existent entre les temps initiaux à Alert et à la station

++++puisque l'on suppose que l'admittance est une constante pour toute la bande, on n'a qu'à transférer qu'une seule onde pour chaque espèce; on déduit les autres par après en se servant des relations d'amplitude et de phase à Alert

Tableau 4. Spectre croisé et corrélation totale entre la station 182(100) input et la station 200(650) output basés sur un enregistrement commun d'une durée de 961 heures.

Bande	Cohérence scalaire		Admittance scalaire		Cohérences Vectorielle		Admittance Vectorielle		Corrélation totale				
	Fréquences négatives	positives	Fréquence négatives	positives	Fréquences négatives	positives	Fréquences négatives	positives					
			amplitude phase	amplitude phase	amplitude phase	amplitude phase	amplitude phase	amplitude phase					
			deg	deg	deg	deg	deg	deg					
0	.750	.612	.764	-2.1	.700	-16.6	.749	.651	1.130	8.5	.502	-3.3	.703
1	.728	.743	.703	-19.9	.886	15.0	.633	.829	.661	-15.5	.915	19.5	.731
2	.918	.956	.592	-.8	.954	7.7	.944	.916	.644	-16.0	.865	-7.2	.918
3	.278	.238	.166	146.1	.247	32.4	.305	.330	.328	-34.8	.191	85.5	.255
4	.071	.337	.052	-136.9	.640	169.6	.203	.507	.325	162.7	.439	-41.2	.149
5	.524	.119	.482	-134.2	.164	11.2	.319	.325	.520	51.6	.252	-137.4	.387
6+	.416	.355	.296	-170.6	.351	128.1	.069	.134	.059	-114.6	.109	62.4	.381

+Nous ne donnons le spectre croisé et la corrélation totale que pour la moitié des bandes disponibles parce que les énergies dans les hautes fréquences sont trop faibles pour donner foi aux résultats du spectre croisé.

fluctuations. Nous ne devons pas oublier d'autre part qu'un estimé fiable des ondes lentes de la marées est presque impossible à obtenir et qu'il faut se méfier d'une valeur basée sur 40 jours d'observations tout au plus.

La bande terdiurne du spectre de puissance nous donne (7.1, -2.0, 295°,-) alors que l'onde terdiurne la plus forte, MK₃, a une valeur de (4.0, -2.0, 283°, 290°). En contraste avec la bande semidiurne, une seule onde dans la bande terdiurne ne peut pas donner un estimé valable de la puissance moyenne dans cette bande. Il en est de même pour les autres bandes qui la suivent.

Le Tableau 4 illustre le calcul du spectre croisé et de la corrélation totale entre la station 185(100) et 200(650) qui sont sur le même amarrage, pour les 6 premières bandes. Nous inspectons d'abord la corrélation totale. Nous voyons qu'elle n'est tolérable que pour les trois premières bandes et qu'elle devient pire que médiocre pour les autres bandes. Il est difficile de croire qu'une telle chose est possible puisque même les oscillations ter et quart diurnes dues à la marée devraient être des mouvements de masse et non des mouvements localisés. Nous nous tournons maintenant du côté du spectre croisé. La cohérence vectorielle pour la bande diurne diffère assez marquement entre les fréquences positives et négatives; le Tableau 7 de la Section B nous indique que le mouvement diurne est plus fortement rotatoire à 650 mètres qu'à 100 mètres et que le sens de rotation est à droite dans les deux cas. Le Tableau 4 nous dit que la cohérence entre les composantes polarisées à gauche à 100 mètres et celles polarisées à droite à 650 mètres est plus forte que la cohérence entre les composantes polarisées à droite à 100 mètres et celles polarisées à gauche à 650 mètres. On peut interpréter ceci en notant qu'il y a un transfert net d'énergie rotative à gauche à 100 mètres en énergie rotative à droite à 650 mètres. L'amplitude de l'admittance vectorielle souligne ce fait, étant plus grande pour les fréquences positives. Tant qu'à la bande semidiurne, on passe d'un régime faiblement rotatif à droite à 100 mètres à un régime rotatif à gauche, de plus faible énergie, à 650 mètres.

B

Application: *l'étude des données de courant recueillies par Chow et Sadler dans le Détroit de Robeson durant les expéditions de 1971 et 1972.*

6. INTRODUCTION

Chow (1975a,b) et Sadler (1976) ont recueilli un ensemble de mesures de courant dans le Détroit de Robeson sous une couverture de glace. Ils en ont fait un dépouillement préliminaire dans les rapports mentionnés et nous voulons maintenant approfondir l'étude de ces données. La figure 1 montre l'emplacement de leurs mesures, la figure 2 montre dans l'horizontale les sites qu'ils ont occupés alors que les figures 3 et 4 montrent l'emplacement des courantomètres dans la verticale. Les profondeurs sont données en mètres dans l'ordonnée. Chow et Sadler ont désigné leurs amarrages par les chiffres 1, 2 et 3 qui sont donnés dans les figures, en abscisse. Les nombres de série des courantomètres employés par Chow sont donnés explicitement dans la figure 3. Le x dans la figure 4 indique un point où la température aussi bien que le courant a été mesuré; on doit noter que le courantomètre à 200 mètres à sa station 2 n'a pas fonctionné.

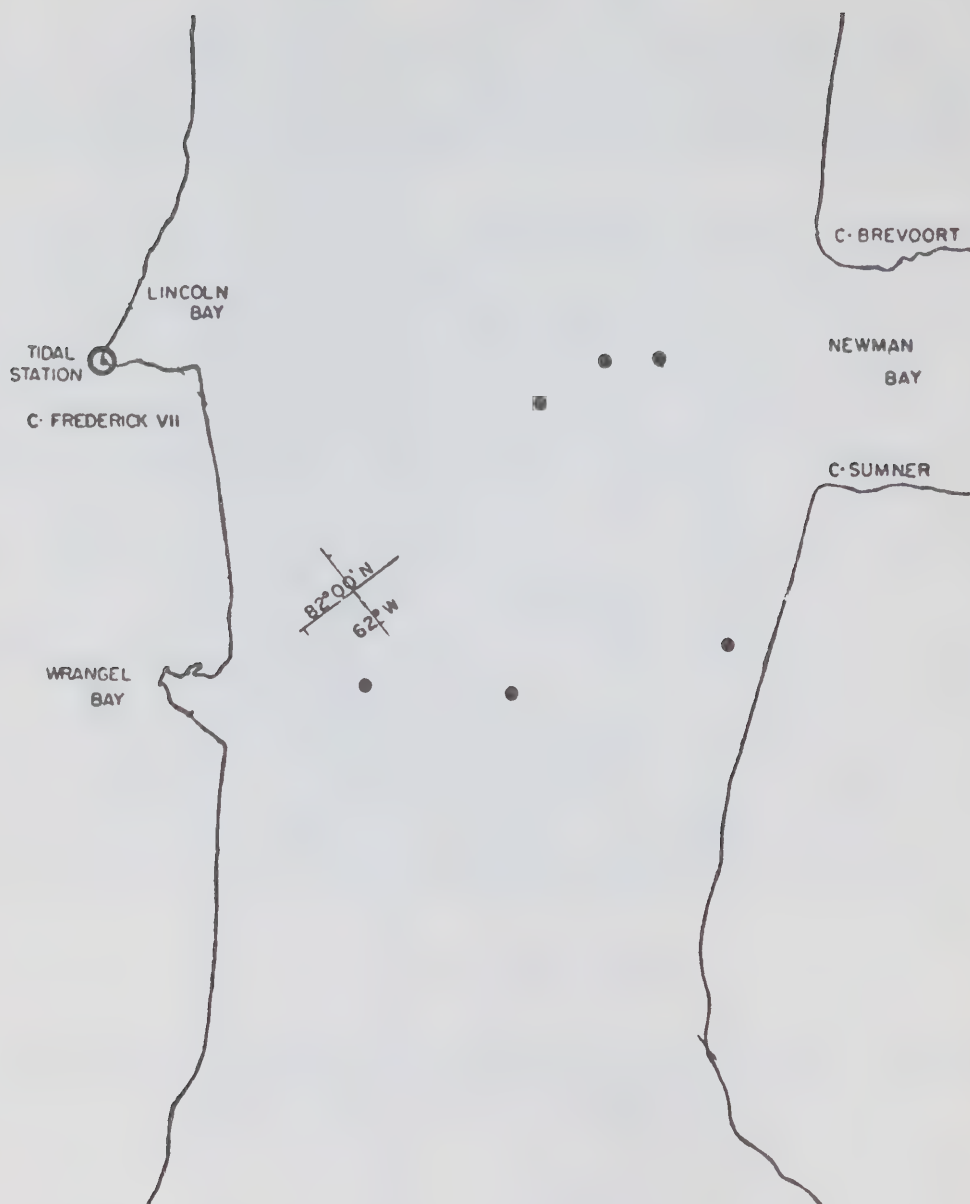


Fig. 2. Emplacement des amarrages de courantomètres. Les stations de Chow sont au nord et sont énumérées 1, 2, 3 de l'ouest à l'est. Les stations de Sadler sont au sud et sont énumérées de la même façon.

7. LA MISE EN GRAPHIQUE DES DONNEES DE COURANT RECUEILLIES

Il est toujours difficile d'obtenir une vue d'ensemble des courants mesurés; pourtant une inspection préliminaire de ces données permettrait d'atteindre des conclusions générales qui seraient raffermies plus tard par des analyses plus serrées. Nous allons donc tenter de donner une vue d'ensemble des courants mesurés par Chow et Sadler dans une suite de figures. Ainsi nous montrerons les courants simultanés soit dans la même colonne verticale d'eau soit dans un même niveau horizontal. De plus l'élément temps est important dans ce type de mesure ainsi que les fluctuations du niveau de la mer. Les figures 5 à 9 essaient de présenter une synthèse de toutes ces variables. Nous avons mis la variable temps en abscisse et nous avons subdivisé les observations en groupes de 12 heures puisque de cette façon nous suivons de près la demi période de la marée. Nous avons mis en regard le niveau d'eau mesuré à Alerte à l'heure donnée (en certain cas, cette "mesure" est une prédiction, à cause du manque de données observées) et le courant correspondant mesuré en même temps, soit à une station donnée et à diverses profondeurs, soit à des stations différentes mais à une profondeur commune (ou rapprochée). Dans le cas des courants l'heure correspondante est indiquée par un chiffre au bout du vecteur correspondant. Juste en dessous du niveau d'eau à Alert, nous avons montré l'orientation moyenne du lit du Détroit de Robeson, qui peut servir d'orientation de référence pour une inspection visuelle (toutefois dans les analyses, il est toujours préférable de se servir d'un système de référence est-nord). La figure 5 montre les enrégistrement simultanés des cinq courantomètres installés à la station 2 de Chow en regard du niveau d'eau à Alert sur une échelle commune de temps. Les enrégistrement simultanés débutent à 01 heure 27/4/71 et se continuent jusqu'à 24 heures 17/5/71.

Nous sommes donc en présence d'un tracé des courants dans les premiers 75 mètres de la colonne d'eau en un point situé un peu à l'est du centre du Détroit de Robeson. Nous nous rendons compte immédiatement de la diversité étonnante de ces mesures: non seulement il y a fort peu d'homogénéité dans la verticale mais le régime de courant à un niveau donné fluctue considérablement d'un cycle de la marée à un autre. Nous remarquons surtout une forte inégalité diurne qui est reflétée à un degré moindre dans le niveau d'eau à Alert.

Une inspection des roses de courants dans la figure 5 indique que ceux-ci ont une tendance nette à tourner à gauche à 2, 7 et 20 mètres. Le sens de rotation devient plus incertain à 50 mètres mais le Tableau 7 nous dira plus tard que les courants ont une faible tendance à tourner vers la gauche, même à ce niveau. Toutefois le sens de rotation change complètement à 75 mètres et la rose des courants indique clairement que ceux-ci tournent à droite. Si nous étudions l'amplitude des courants maintenant, nous voyons qu'ils tendent à augmenter avec la profondeur; de plus il y a évidence d'un courant moyen dirigé vers le sud ouest dans les plus grandes profondeurs. Ce courant moyen (s'il existe) est beaucoup plus faible et variable près de la surface. Son influence est plus manifeste à toutes les 24 heures quand la rose des courants devient un secteur à cause de la forte inégalité diurne qui prévaut à tous les niveaux. En vue de tout ceci, nous nous demandons quelle est l'utilité pratique de prendre des mesures courant dans la couche de surface.

Si nous suivons maintenant l'évolution de ces courants dans le temps,

nous voyons que lorsque le courant moyen devient très faible durant un certain intervalle, les roses de courant prennent leur allure classique d'ellipse et révèlent clairement leur sens de rotation. Nous notons aussi une très haute variation dans l'intensité des courants lorsqu'on va d'un régime de morte eau à un régime de vive eau: ce qui nous porte à croire que si l'on veut vraiment mesurer objectivement des courants en un point, ils est bon de prolonger les mesures sur au moins quinze jours afin d'évaluer cette amplification puisque le bruit ambiant ne permet pas une résolution fiable et stable des ondes composantes de la marée dans la bande semidiurne.

Nous notons aussi d'étranges fluctuations dans l'intensité des courants dans la verticale: à certains moments le courant à 2 mètres est définitivement plus fort qu'aux niveaux inférieurs. Ceci semble inconcevable à première vue puisque les observations ont été prises sous la glace et que l'action du vent ne peut pas affecter le courant mesuré à ce niveau. Quelle est donc la source motrice de ce mouvement? Pour le moment la réponse nous échappe.

Nous avons mis en regard dans la figure 6 les données à 50 mètres aux stations 1 et 3 de Chow et celles à 75 mètres de sa station 2 sur l'intervalle 01 heure 23/5/71-12 heures 7/6/71. Ces stations sont séparées par à peine 7 km et les enregistrements devraient avoir un air de famille. Nous nous rendons compte rapidement que tel n'est pas le cas: le régime à 75 mètres est nettement différent, le courant y est plus rotatoire avec une tendance nette à tourner à droite alors qu'à 50 mètres le courant est plus rectiligne avec une tendance à tourner à gauche. Les enregistrements à 50 mètres se ressemblent un peu plus mais ils sont loins d'être identiques. Il semble que le courant moyen contraste assez entre les station 1 et 3 de telle façon qu'il modifie différemment la rose des courants à ces deux points. D'autre part une inégalité diurne assez forte peut être notée aux trois sites.

Nous voyons dans la figure 7 une partie des enregistrements dans la colonne d'eau entre la surface et le fond pour la station 2 de Sadler: ces données débutent à 12 heures 27/4/72. Il n'y a pas de doute qu'il aurait été plus intéressant d'obtenir la même série de mesures à sa station 1 où le flot d'eau arctique est à son plus fort, mais naturellement nous devons nous contenter de ce qui est disponible.

Nous notons l'existence d'un certain courant moyen qui se manifeste dès les 50 mètres mais celui-ci n'est pas tellement fort et il varie d'intensité dans le temps. Une inspection dans la verticale nous indique que le courant est rotationnel à la surface avec une tendance à tourner à gauche, qu'il acquiert un caractère rectiligne à 50 mètres, qu'il se met à tourner à droite à 100 mètres mais qu'à 500 et 600 mètres il a repris encore une fois sa tendance à tourner à gauche. Donc quelque part entre 100 et 500 mètres, le courant doit avoir un caractère rectiligne.

Si nous suivons maintenant le développement des roses de courant dans le temps, nous voyons qu'elles changent d'intensité considérablement entre les phase de vive eau et de morte eau et qu'à tous les niveaux il y a une inégalité diurne très appréciable. Finalement nous notons qu'il y a des temps où le courant moyen s'intensifie ou s'affaiblit. Lorsqu'il s'intensifie on peut voir qu'il tend à se diriger vers le sud ouest au niveau de 100 mètres. Souvent alors le courant à 600 mètres est dirigé vers une direction opposée c'est à dire vers le nord est, ce qui indique une circulation interne

considérable entre ces niveaux. Par conséquent le transport de masse dans cette colonne d'eau est définitivement bien loin d'être homogène.

Nous inspectons maintenant dans la figure 8 une partie de l'enregistrement près de la surface qui débute à 12 heures 27/4/72 aux trois stations occupées par Sadler. Nous nous rendons compte en un coup d'oeil de l'incroyable diversité et variabilité de ce type de mesure. En fait l'enregistrement le plus facile à suivre est celui de la station 3. Là il y a évidence d'un courant moyen très appréciable qui transforme la rose des courants en un secteur angulaire. Ce courant moyen toutefois est très variable et le secteur est orienté dans toutes les directions et se transforme quelquefois en une ellipse véritable lorsque le courant moyen faiblit.

Un courant moyen semble exister aussi aux deux autres stations mais il a moins d'influence sur la rose des courants. Le courant à ces deux stations semble manquer d'homogénéité dans le temps et semble passer par des phases de courant rectiligne et des phases de courant rotatoire. La seule chose qui semble commune à ces enregistrements est la tendance des courants à tourner vers la gauche.

Nous voyons dans la figure 9 l'ensemble des courants mesurés simultanément à 100 mètres aux stations 1, 2 et 3 de Sadler à partir de 12 heures 27/4/72. Nous notons, avant de passer à l'inspection de ces diagrammes, que l'enregistrement à la station 3 est fautif. L'échelle du temps est probablement en erreur et il y a une perte successive d'au moins trois heures d'observations au cours de l'enregistrement. En dépit de ceci, l'enregistrement a une certaine utilité puisqu'au début des observations, les heures ont une bonne chance d'être correctes et il doit reproduire assez fidèlement les fluctuations du courant moyen à cet endroit sur tout l'intervalle d'observations.

Nous sommes frappés immédiatement par la diversité des courants mesurés à un niveau commun bien éloigné de la surface, dans une section donnée. A la station 1 il y a évidence d'un courant moyen dirigé vers le sud ouest qui est modulé par le courant de marée. A la station 2, un courant moyen semblable s'affirme sur certains intervalles alors qu'à d'autre temps nous nous trouvons en présence d'une ellipse classique de courant de marée. A la station 3, nous voyons que le régime de courant est extrêmement variable. Un courant moyen existe mais celui-ci semble osciller dans toutes les directions (tout ceci évidemment trahirait peut-être un enregistrement fautif).

La pointe du vecteur à la station 1 semble tracer une sorte de 8 et le Tableau 7, page 47-48, nous informe que le courant diurne a une faible tendance à tourner à gauche alors que le courant semidiurne a une faible tendance à tourner à droite. A la station 2, il est plus clair que le courant a tendance à tourner à droite et il en est de même à la station 3.

L'ensemble des courants a une tendance à augmenter d'intensité au moment de la marée de vive eau et à diminuer considérablement durant la marée de morte eau. De plus nous notons que lorsque le courant moyen est très intense à la station 1, ce même type de courant est manifeste à la station 2. Quand il faiblit à la station 1, le courant devient presque pur courant de marée à la station 2. Lorsque le courant moyen s'intensifie il se manifeste donc

dans une masse d'eau plus étendue, ce qui veut dire que la masse d'eau transportée vers la mer de Baffin n'est pas proportionnelle à l'amplitude du courant moyen à la station 1 et que son augmentation suit une loi plus rapide que la loi linéaire. Il semble y avoir peu de corrélation entre les fluctuations du courant moyen aux stations 1 et 2 et celles notées à la station 3. Celles-ci sont définitivement erratiques et peuvent dénoter soit un mal-fonctionnement de l'instrument soit un flot d'eau tout à fait irrégulier du côté du Groenland.

Le Tableau 5 donne une idée de l'ensemble des données de courant qui seront étudiées dans ce rapport. Tous les temps mentionnés dans ce travail sont des temps moyen de Greenwich (TMG).

8. LES STATIONS COTIERES

La méthode d'admittance (voir Section A) requiert l'utilisation d'une station marégraphique côtière (ou submergée si la qualité et la longueur de l'enregistrement permettent son utilisation). Dans le cas qui nous occupe, Alert est la seule station disponible. Les observations de Chow ont pu être mises en regard avec Alert mais malheureusement la jauge n'a pas fonctionné quand Sadler fit ses mesures de courant; dans ce cas il nous a fallu employer les valeurs horaires prédites pour Alert comme input.

La compréhension des résultats des analyses des courants peut être facilitée si l'on dispose de cartes cotidiales; celles-ci sont élaborées à partir d'observations le long des côtes. Deux stations ont été occupées durant les mesures de courant en 1971, soient la Baie Lincoln et la Baie Wrangel; la Baie Lincoln a été réoccupée en 1975. Les résultats des analyses à ces stations ainsi que ceux des stations avoisinantes permettra d'élaborer de telles cartes. Le Tableau 6 donne les valeurs des ondes composantes K_1 et M_2 pour les stations qui ont été utilisées pour la construction des cartes cotidiales.

9. LE COURANT MOYEN

On peut débarasser les observations de courant recueillies de la majeure partie de l'action de la marée en les soumettant au filtre passe-bas:

$$A_{24}^2 A_{25}$$

et nous montrons le résultat de ce filtrage dans les figures 10 à 14 qui correspondent aux temps et aux sites illustrés dans les figures 5 à 9. Nous mettons en regard les composantes X et Y dans les directions choisies par Chow et Sadler; ces figures aident à suivre l'homogénéité ou son manque dans une colonne d'eau donnée ou à un niveau donné. Nous pouvons aussi juger de la constance ou de la variabilité du courant moyen dans le temps.

10. LES ANALYSES

Toutes les données de courant ont été soumises à des analyses harmoniques et spectrales telles que décrites dans la Section A. On a suppléé aux

Tableau 5. Données de courant étudiées dans ce rapport.

Auteur	Site	Courantomètre ↓	Profondeur mètres	Taux d'échantillonnage minutes	Début et fin des observations (après lissage et décimation)	Nombre de valeurs horaires accumulées
Chow	82°1.6'N 60°57.0'W	238	50	20	22.67 heures 23/5/71 16.67 heures 7/6/71	355
Chow	82°2.0'N 61°3.0'W	232	2.25	60	20.68 h 29/4/71 18.68 h 30/5/71	743
Chow	82°2.0'N 61°3.0'W	233	7.25	60	20.53 h 29/4/71 18.53 h 27/5/71	671
Chow	82°2.0'N 61°3.0'W	236	20	60	23.63 h 29/4/71 21.63 h 26/5/71	647 (432 de valides)
Chow	82°2.0'N 61°3.0'W	235	50	60	22.80 h 29/4/71 8.80 h 18/5/71	443
Chow	82°2.0'N 61°3.0'W	234	75	60	.83 h 26/4/71 12.83 h 7/6/71	1021
Chow	82°2.4'N 61°17.0'W	237	50	60	.27 h 4/5/71 16.27 h 7/6/71	833
Sadler	81°58.8'N 62°6.5'W	234	5	20	23.15 h 23/4/72 21.15 h 3/6/72	983
Sadler	81°58.8'N 62°6.5'W	182	100	20	23.17 h 23/4/72 21.17 h 3/6/72	983
Sadler	81°58.8'N 62°6.5'W	200	650	20	22.27 h 24/4/72 22.27 h 3/6/72	962
Sadler	81°55.9'N 61°49.3'W	237	5	20	21.20 h 25/4/72 15.20 h 3/6/72	931
Sadler	81°55.9'N 61°49.3'W	233	10	20	21.50 h 25/4/72 17.50 h 3/6/72	933
Sadler	81°55.9'N 61°49.3'W	238	50	20	21.50 h 25/4/72 17.50 h 3/6/72	933
Sadler	81°55.9'N 61°49.3'W	235	100	20	21.47 h 25/4/72 17.47 h 3/6/72	933
Sadler	81°55.9'N 61°49.3'W	232	500	20	18.53 h 26/4/72 18.53 h 3/6/72	913
Sadler	81°55.9'N 61°49.3'W	236	600	20	18.47 h 26/4/72 18.47 h 3/6/72	914
Sadler	81°53.7'N 61°16.4'W	193	10	20	1.23 h 27/4/72 13.23 h 3/6/72	901
Sadler	81°53.7'N 61°16.4'W	201	100	20	1.33 h 27/4/72 9.33 h 3/6/72	897

Tableau 6. Ondes composantes K₁ et M₂ pour les stations qui ont été utilisées dans l'élaboration des cartes cotidales.

Nom	Z = 0	Nombre de référence	Position	K ₁		M ₂	
				amplitude cm	phase degrés	amplitude cm	phase degrés
Foulke Fjord	3690	78°18'N 72°38'W	32.0	262	111.0	112	
Rensselaer Bay	3710	78°37'N 71°00'W	25.9	268	102.8	123	
Thank God Harbour	3735	81°36'N 61°38'W	12.2	306	54.9	112	
Cape Bryant	3755	82°22'N 55°08'W	9.8	346	12.8	124	
Alert	3766	82°30'N 62°19'W	4.7	3	20.9	65	
Cape Sheridan	3780	82°27'N 61°30'W	4.9	359	24.4	66	
Lincoln Bay [†]	3782	82°07'N 62°04'W	6.6 ^{††}	304	38.1 ^{††}	92	
(1971)			6.1	310	38.0	101	
(1975)			8.4	310	44.0	107	
Wrangel Bay [†]	3785	82°00'N 62°30'W	8.5	286	59.8	104	
Discovery Harbour	3790	81°44'N 64°44'W	34.5	253	116.8	114	
Pim Island	3840	78°40'N 74°10'W					

[†]valeurs obtenues en calculant l'admittance entre Alert et la station
^{††}les valeurs d'amplitudes contenues dans nos filières étaient la moitié des valeurs
présentées: il semble y avoir eu une erreur de calibration dans les données
originales de 1971.

carences de l'analyse harmonique en calculant l'admittance entre les niveaux d'eau à Alert et les composantes X et Y choisies par Chow et Sadler dans leurs observations de courant. L'inconvénient de leur choix d'ordonnées est que les inclinaisons obtenues, étant référées à des axes d'orientation arbitraire, peuvent prêter à confusion. Donc les analyses une fois complétées, nous avons ramené toutes nos inclinaisons par rapport au système conventionnel est-nord pour éviter cette confusion inutile. Les résultats de ces analyses préliminaires sont donnés dans une série de tableaux et de figures.

Le Tableau 7 donne les ondes composantes diurne et semidiurne dérivées du calcul d'admittance entre Alert et la station donnée. Les composantes de cette admittance sont pour le choix d'ordonnées de Chow et Sadler mais les éléments de l'ellipse composante dans la partie droite du tableau sont pour un système conventionnel est-nord et par conséquent toutes les quantités données dans cette partie du tableau peuvent être considérées comme invariables et ne prêtent à aucune ambiguïté dans leur interprétation.

Le Tableau 8 donne les résultats des analyses harmoniques directes; il supplée une plus grande richesse d'information, mais ce type d'analyse ne suffit pas en général à résoudre adéquatement les ondes composantes diurnes et semidiurnes comme la technique d'admittance réussit à le faire (si les cohérences sont adéquates et si la station input est appropriée). Dans le Tableau 8 nous obtenons Z_0 qui est la moyenne du courant mesuré sur l'intervalle d'observation. Nous ne donnons que les ondes K_1 et M_2 dans les bandes diurnes et semidiurnes puisque nous sommes plus satisfaits avec les valeurs du Tableau 7. Tant qu'aux ondes de fréquence supérieures, nous n'avons retenu que celles dont le demi-grand axe dépasse 1 cm/sec.

Nous n'avons pas cru nécessaire de mettre en tableau les résultats des analyses spectrales et nous les représentons tout au plus sous forme de diagramme car elles n'ont pas la finesse des analyses harmoniques. Les figures 15 à 21 montrent les graphiques correspondant aux analyses harmoniques directes des données de Chow alors que les figures 22 à 32 correspondent à celles des observations de Sadler. Les quantités représentées dans ces diagrammes sont décrites en détails dans mon livre sur l'analyse des marées et permettent de juger en un coup d'oeil du succès (ou de la faiblesse) d'une analyse ainsi que du caractère du courant mesuré au point donné.

Les figures 33 à 39 et 40 à 50 montrent en graphique les résultats des analyses spectrales sur les mêmes suites d'observations de courant traitées harmoniquement dans les figures 15 à 32. Cette fois-ci nous obtenons une vue d'ensemble sur la structure spectrale totale des observations de courant recueillies plutôt que la valeur spécifique du spectre aux fréquences des marées.

La Section A indique que l'évaluation du spectre de puissance d'une suite d'observations sur les courant donnent les quantités suivantes:

S_+ : le spectre de puissance des composantes spectrales polarisées à gauche,

S_- : le spectre de puissance des composantes spectrales polarisées à droite,

$S^t = S_+ + S_-$: le spectre de puissance total à une fréquence donnée

Auteur	Station	Courantomètre	Profondeur mètres	Fréquence cycles/heure	X (220°)		Y (130°)		Ondes Composantes				Phase de Greenwich degrés		
					Cohérence	Phase deg	Amplitude deg	Cohérence	Phase deg	Amplitude cm/sec	Demi-grand axe cm/sec	Demi-petit axe m		Inclinaison θ degrés	
Chow	3	238	50	.040	.982	-151.4	45.45	.988	-139.9	16.00	0 ₁ K ₁ P ₁	4.18 7.46 2.36	.27 .47 .15	239 239 239	132.4 147.6 146.4
Différence de temps initial Δ = +.67 heure															
Chow	2	232	2.25	.040	.992	-127.2	25.61	.962	-112.5	21.11	0 ₁ K ₁ P ₁	2.87 5.10 1.61	.36 .65 .20	259 259 259	147.5 161.5 160.4
Δ = -.32 heure															
					.986	105.3	14.50	.987	155.9	12.62	M ₂ N ₂ S ₂ K ₂	11.95 1.99 5.80 1.76	5.55 .93 2.70 .82	259 259 259 259	36.6 18.6 80.6 77.4
	2	233	7.25	.040	.995	-134.8	29.93	.994	-121.2	24.73	0 ₁ K ₁ P ₁	2.46 5.98 1.89	.50 .70 .23	259 259 259	151.3 166.3 165.3
Δ = +.53 heure															
					.994	86.3	14.95	.998	124.1	12.45	M ₂ N ₂ S ₂ K ₂	12.67 2.10 6.4 1.86	4.25 .70 2.1 .63	258 258 258 258	36.6 18.2 81.5 78.1
	2	236	20	.040	.978	-135.5	34.05	.997	-117.6	21.25	0 ₁ K ₁ P ₁	3.46 6.16 1.95	.24 .86 .28	251 251 251	151.4 166.5 165.3
Δ = +.63 heure															
				.080	.947	84.1	16.20	.969	123.2	10.94	M ₂ N ₂ S ₂ K ₂	12.78 2.13 6.19 1.88	4.13 .69 2.00 .61	251 251 251 251	33.5 14.8 78.6 75.2

Tableau 7. Valeurs déduites à l'aide de l'admittance des ondes composantes principales diurnes et semidiurnes dans les observations de courant recueillies par Chow et Sadler en 1971 et 1972 dans le Détroit de Robeson. Alert est la fonction input. (suite)

Auteur	Station	Courantomètre	Profondeur mètres	Fréquence cycles/heure	X(220°)		Y(130°)		Ondes Composantes				Inclinaison [†] θ degrés	Phase de ++ Greenwich g degrés
					Coherence	Phase deg	Amplitude deg	Phase deg	M cm/sec	Demi-grand axe cm/sec	Demi-petit axe m			
Chow	2	235	50	.040	.992	-139.0	46.65	.994	-114.5	12.28	O ₁ K ₁ P ₁	.44 .77 .24	234 234 234	146.9 162.0 79.8
	Δ = +.80 heure													
	2	234	75	.040	.991	-146.6	50.04	.901	-177.2	18.98	O ₁ K ₁ P ₁	4.58 8.13 2.58	239 239 239	134.9 150.2 149.0
	Δ = +.83 heure													
				.080	.998	71.0	50.48	.989	6.0	16.25	M ₂ N ₂ S ₂ K ₂	-10.01 -1.66 -4.86 -1.48	229 229 229 229	12.7 353.9 57.9 54.6
	1	237	50	.040	.969	-135.8	43.02	.980	-99.4	16.77	O ₁ K ₁ P ₁	3.93 7.01 2.21	238 238 238	145.2 159.9 158.6
	Δ = +.27 heure													
				.080	.997	106.1	31.08	.989	120.0	14.49	M ₂ N ₂ S ₂ K ₂	2.18 .36 1.06 .32	245 245 245 245	36.4 17.9 81.1 77.6
	Y(135°)													
	1	234	5	.040	.905	-132.2	30.89	.861	-95.1	15.31	O ₁ K ₁ P ₁	2.91 5.16 1.63	248 248 248	149.4 163.9 162.8
Δ = +.15 heure														
			.080	.996	102.6	19.85	.996	147.5	15.48	M ₂ N ₂ S ₂ K ₂	6.37 1.06 3.08 .93	260 260 260 260	42.5 24.2 87.2 83.7	

Tableau 7. Valeurs déduites à l'aide de l'admittance des ondes composantes principales diurnes et semidiurnes dans les observations de courant recueillies par Chow et Sadler en 1971 et 1972 dans le Détroit de Robeson. Alert est la fonction input. (suite)

Auteur	Station	Courantomètre	Profondeur mètres	Fréquence cycles/heure	X(225°)		Y(135°)		Onde		Ondes Composantes		Inclinaison [†] θ degrés	Phase de ^{††} Greenwich g degrés
					Cohérence	Phase deg	Amplitude deg	Cohérence	Phase deg	Amplitude M cm/sec	axé m cm/sec	axé m cm/sec		
2	238	50	.040	.980	-133.4	43.66	.960	-76.7	9.03	O ₁	3.81	.67	232	147.8
										K ₁	6.82	1.16	232	162.8
										P ₁	2.16	.37	232	161.9
Δ = +.50 heure			.080	.998	118.1	35.20	.976	111.9	7.34	M ₂	24.68	-.53	237	52.4
										N ₂	4.10	.09	237	33.7
										S ₂	11.96	-.26	237	97.3
										K ₂	3.63	-.08	237	93.9
										O ₁	4.20	-.80	222	148.7
										K ₁	7.48	-1.43	222	163.6
2	235	100	.040	.979	-128.8	54.34	.813	124.9	9.48	P ₁	2.36	-.45	222	162.5
										M ₂	26.10	-.51	216	38.5
										N ₂	4.33	-.08	216	20.0
Δ = +.47 heure			.080	.998	104.7	37.51	.883	-68.0	6.04	S ₂	12.65	-.25	216	83.4
										K ₂	3.84	-.07	216	80.0
										O ₁	4.45	.18	235	131.8
2	232	500	.040	.975	-149.2	50.40	.783	-135.9	9.12	K ₁	7.93	-.32	235	146.8
										P ₁	2.51	.10	235	145.7
										M ₂	18.89	2.18	234	23.3
Δ = +.53 heure			.080	.998	86.9	27.16	.976	123.8	5.35	N ₂	3.13	.36	234	4.8
										S ₂	9.16	1.06	234	68.3
										K ₂	2.78	.32	234	64.9
2	236	600	.040	.989	-147.3	58.6	.952	-73.6	11.22	O ₁	5.10	.94	228	133.1
										K ₁	9.09	1.67	228	148.0
										P ₁	2.87	.53	228	146.9
Δ = +.47 heure			.080	.998	91.6	26.53	.984	-161.9	8.57	M ₂	18.31	5.62	219	23.4
										N ₂	3.04	.93	219	4.9
										S ₂	8.88	2.72	219	68.3
										K ₂	2.69	.83	219	64.9

Tableau 7. Valeurs déduites à l'aide de l'admittance des ondes composantes principales diurnes et semi-diurnes dans les observations de courant recueillies par Chow et Sadler en 1971 et 1972 dans le Détroit de Robeson. Alert est la fonction input. (Conclu)

Auteur	Station	Courantomètre	Profondeur mètres	Fréquence cycles/heure	X(225°)		Y(135°)		Ondes Composantes					Phase de ++ Greenwich g degrés						
					Cohérence	Phase deg	Amplitude deg	Cohérence	Phase deg	Amplitude cm/sec	Onde	Demi-grand axe M cm/sec	Demi-petit axe m cm/sec		Inclinaison ⁺ θ degrés					
Δ = +.23 heure	3	193	10	.040	.972	-146.9	50.62	.962	-108.6	30.80	O ₁	4.94	1.48	253	138.7					
											K ₁	8.80	2.64	253	153.4					
											P ₁	2.78	.83	253	152.3					
					.080	.992	91.3	19.15	.998	129.5	20.95	M ₂	18.44	6.36	273	39.2				
												N ₂	3.06	1.06	273	20.7				
												S ₂	8.94	3.08	273	83.8				
												K ₂	2.71	.94	273	80.4				
												(#!) x								
												O ₁	5.76	-.82	235	101.6				
												K ₁	10.27 (9.6)	-1.46 (1.4)	235 (248)	116.4 (145.6)				
												P ₁	3.25	-.46	235	115.3				
					.080	.894	35.0	38.27	.948	15.3	7.82	M ₂	26.76 (32.2)	-1.78 (-6.2)	236 (229)	323.9 (5°)				
												N ₂	4.44	-.30	236	305.4				
S ₂												12.97	-.86	236	8.6					
K ₂												3.93	-.26	236	5.2					

+ L'inclinaison est mesurée à partir de l'abscisse, soit l'est, en degrés trigonométriques
 ++ La phase de Greenwich g déduite de l'admittance a été corrigée par une phase équivalente au temps Δ, pour tenir compte de la différence du temps initial à Alert qui tombe sur l'heure alors que la valeur lissée du courant peut tomber sur une fraction d'une heure
 +++ La station 2 de Sadler à 5 mètres semble souffrir de pertes de données au début de la lecture: la phase donnée correspond à l'analyse originale alors que la phase en parenthèses est la phase augmentée de l'équivalent en phase de 40 minutes
 +++ Les données de la station 3 de Sadler semblent fautives: il y a une perte d'environ trois heures de données entre le début et la fin de l'enregistrement. L'analyse ne peut donc pas être considérée comme valable. Toutefois le calcul d'admittance entre Alert et les neuf jours initiaux d'observations permettent de faire un estimé assez grossier des constantes véritables à ce site
 x Résultats d'une analyse sur les premières 216 heures d'observations. (en parenthèses)

Tableau 8. Résultats des analyses harmoniques des mêmes données de courant que dans le Tableau 3 (Seules les ondes K_1 et M_2 dans les bandes diurnes et semidiurnes sont incluses. De même les ondes de longue période sont exclues à l'exception du courant moyen. Dans les ondes de hautes fréquence, seules celles dont le demi-grand axe dépasse 1 cm/sec ont été retenues).

Temps moyen de Greenwich Z = 0

Auteur	Station	Courantomètre	Profondeur mètres	Onde	Demi-grand axe M cm/sec	Demi-petit axe m cm/sec	Inclinaison θ degrés	Phase de Greenwich g degrés
Chow	3	238	50	Z_0	4.16	0.	246	0.
				K_1	8.59	.34	239	144.6
				M_1	20.39	3.25	244	37.5
				M_2	3.17	-2.31	311	71.7
				SK_3	1.05	-.30	282	271.4
				M_3	2.81	-2.01	308	235.3
				MS_4	1.18	-.56	244	318.4
				$2MN_5$	1.05	-.44	356	175.2
				M_6	1.16	.40	303	136.2
Chow	2	232	2.25	Z_0	2.98	0.	266	0.
				K_1	5.94	.60	263	152.4
				M_1	11.68	5.88	259	37.6
				M_2	1.42	.39	259	279.7
				MK_3	2.30	-.73	306	266.5
				M_4	1.56	-.53	320	187.3
	2	237	7.25	Z_0	3.85	0.	255	0.
				K_1	6.62	.80	262	153.6
				M_1	12.90	4.46	259	38.9
				M_2	1.42	.39	275	272.6
				MK_3	3.13	-.26	287	269.4
				M_3	1.60	-.17	305	192.4
				MS_4	1.30	-.10	357	169.3
				M_6	1.06	.36	256	90.5
	2	236	20	Z_0	4.29	0.	254	0.
				K_1	6.68	1.01	252	154.4
				M_2	12.45	4.06	253	38.5
				M_3	1.50	.22	260	163.4
				MS_4	1.26	-.07	0	170.6
				M_6	1.13	.31	245	82.9
				$2MS_6$	1.16	.34	260	156.5
	2	235	50	Z_0	6.43	0.	239	0.
				K_1	7.29	.67	233	149.2
				M_1	18.48	2.09	238	35.6
				M_2	1.56	.44	268	259.9
				M_3	1.20	-.73	327	194.4
				MS_4	2.53	-.88	350	188.7
				$2MN_5$	1.00	.33	228	222.5
				M_6	1.71	.02	235	102.1
				$2MS_6$	1.15	-.15	259	148.6
	2	234	75	Z_0	10.58	0.	235	0.
				K_1	9.13	-1.59	237	141.7
				M_2	34.36	-9.62	228	14.2
				M_3	1.01	-.25	233	210.6
				MK_3	2.82	-1.47	280	297.7
				M_4	1.26	-.09	309	296.3
				MS_4	1.91	-1.48	280	269.1
Chow	1	237	50	Z_0	10.44	0.	243	0.
				K_1	8.57	1.48	239	153.4
				M_1	23.35	2.05	245	37.8
				M_2	1.09	-.61	315	308.9
				MK_3	3.65	-2.60	331	303.8
				MN_4	1.02	-.51	289	190.0
				M_4	2.38	-.74	301	213.4
				SN_4	1.02	.02	315	282.0
				MS_4	1.93	-1.18	268	282.6

Tableau 8. (suite)

Sadler	1	234	5	Z ₀	7.71	0.	260	0.
				K ₁	5.73	1.65	244	160.6
				M ₂	16.60	6.64	259	42.2
				MK ₃	2.01	.17	249	181.7
				SK ₃	1.22	-.66	294	287.9
				MN ₄	1.09	-.32	353	52.8
				M ₄	1.70	.03	27	32.9
				MS ₄	1.01	-.75	329	63.4
				M ₄	1.37	-.09	247	284.8
				2MS ₆	1.14	-.08	244	352.1
				Z ₀	42.17	0.	225	0.
				K ₁	10.79	-1.39	230	164.6
				M ₂	31.20	-1.26	217	35.3
				MO ₃	1.58	.29	165	140.9
				MK ₃	3.98	-2.01	282	290.2
				SK ₃	1.40	-.74	247	272.0
1	182	100	100	MN ₄	1.27	-1.20	309	17.8
				M ₄	2.59	-.88	305	22.9
				MS ₄	1.99	-1.39	298	37.3
				2MN ₆	1.49	-.76	26	94.1
				M ₆	1.64	-.59	35	108.3
				2MS ₆	1.53	.16	34	164.5
				3MS ₈	1.03	.01	233	34.8
				Z ₀	19.86	0.	212	0.
				K ₁	12.10	1.56	223	150.8
				M ₂	24.98	4.77	220	35.9
				MO ₃	1.15	-.10	260	143.5
				MK ₃	1.43	.30	342	19.4
				SK ₃	1.07	.39	304	346.4
				MN ₄	1.84	.58	235	115.2
				M ₄	2.43	1.31	207	111.0
				MS ₄	2.47	1.19	268	212.7
2	200	650	650	S ₄	1.26	-.47	246	165.3
				M ₆	1.12	-.19	332	.6
				MSN ₆	1.06	.39	329	2.3
				2MS ₆	1.62	.99	226	238.7
				3MS ₈	1.06	.06	233	299.8
				Z ₀	7.97	0.	232	0.
				K ₁	5.78	.62	245	142.0
				M ₂	15.00	5.42	249	36.4
				MK ₃	1.72	-.74	230	182.4
				MS ₄	1.41	.52	230	190.2
				Z ₀	8.87	0.	240	0.
				K ₁	6.47	.83	252	152.8
				M ₂	16.76	4.85	254	57.9
				MK ₃	1.96	-.80	236	221.4
				M ₄	1.05	.66	216	195.3
				MS ₄	1.34	.17	226	240.9
2	233	10	10	Z ₀	16.06	0.	231	0.
				K ₁	7.82	1.33	231	156.4
				M ₂	25.72	-.69	236	53.3
				MK ₃	1.91	-.44	231	212.5
				MN ₄	1.25	-.13	350	260.8
				M ₄	2.01	-.43	352	302.6
				Z ₀	12.17	0.	211	0.
				K ₁	10.59	-1.59	222	158.5
				M ₂	26.74	-.41	216	40.5
				MO ₃	2.37	-.93	234	293.8
				M ₃	1.29	-.20	283	219.9
				MK ₃	4.16	-1.56	277	331.5
				SK ₃	1.23	.24	255	5.7
				MN ₄	1.69	-1.29	344	247.3
				M ₄	3.21	-1.78	211	86.0
				MS ₄	2.13	-.72	228	118.6
2	235	100	100	MSN ₆	1.04	-.49	261	352.7
				Z ₀	12.17	0.	211	0.
				K ₁	10.59	-1.59	222	158.5
				M ₂	26.74	-.41	216	40.5
				MO ₃	2.37	-.93	234	293.8
				M ₃	1.29	-.20	283	219.9
				MK ₃	4.16	-1.56	277	331.5
				SK ₃	1.23	.24	255	5.7
				MN ₄	1.69	-1.29	344	247.3
				M ₄	3.21	-1.78	211	86.0
				MS ₄	2.13	-.72	228	118.6
				MSN ₆	1.04	-.49	261	352.7
				Z ₀	12.17	0.	211	0.
				K ₁	10.59	-1.59	222	158.5
				M ₂	26.74	-.41	216	40.5
				MO ₃	2.37	-.93	234	293.8

(le temps semble être
en erreur de 40 minutes)

Tableau 8. (conclu)

	2	232	500	Z ₀	1.44	0.	115	0.
				K ₁	10.11	.67	233	139.5
				M ₁	19.43	2.26	234	24.2
				MR ₃	1.46	.07	302	345.6
				M ₄	1.92	-.23	299	220.4
				MS ₄	1.27	-.16	310	228.7
	2	236	600	Z ₀	2.51	0.	322	0.
				K ₁	11.33	1.96	227	138.9
				M ₁	18.77	5.86	219	24.5
				MR ₃	1.10	-.18	173	237.0
Sadler	3	193	10	Z ₀	12.41	0.	296	0.
				K ₁	10.24	2.88	255	149.8
				M ₁	19.13	6.67	273	40.0
				M ₀	2.47	-.02	351	156.6
				M ₃	1.46	.23	307	42.9
				MR ₃	2.78	2.00	345	190.5
				MN ₄	2.08	.92	282	13.5
				M ₄	5.25	1.43	297	54.5
				MS ₄	2.01	.48	336	125.4
				M ₄	1.06	-.13	355	33.6
				MS ₆	1.32	-.23	261	184.9
	3	201	100	Z ₀	4.62	0.	304	0.

Reste de l'analyse invalide à cause de la perte successive de données.

+mesurée à partir de l'axe des X(est)
en degrés trigonométrique.

- 0: l'orientation de l'ellipse (une quantité effectivement invariante si l'on se sert systématiquement d'un système de référence est-nord),
- R: le coefficient de rotation. Celui-ci varie entre -1 et +1: il mesure la tendance de la composante spectrale du courant à tourner à droite (-1), à gauche (+1), ou à être rectiligne (0) et
- s: le coefficient de stabilité. Celui-ci varie entre 0 et 1: il mesure la tendance de la composante à rester en place (=1).

Nous avons utilisé une bande de fréquence d'une largeur d'un cycle par 24 heures (.0417 c/h) de façon à obtenir des estimés stables; les deux premières bandes, .0417 et .0833, correspondent aux marées diurnes et semidiurnes.

Les Tableaux 7 et 8 ainsi que les figures 15 à 32 indiquent que les analyses harmoniques et les calculs d'admittance ont assez bien réussi en général. Nous nous considérons satisfaits de toutes les observations de Chow; la phase de 13° pour M_2 calculée à 75 mètres à sa station 2 nous surprend un peu car ceci indique une différence de temps de l'ordre de près de 40 minutes entre les maxima des courants semidiurnes à 50 et 75 mètres, ce qui semble un peu fort. Les observations à la station 2 de Sadler indiquent une différence de temps de l'ordre de 27 minutes entre les niveaux de 50 et 100 mètres; il y a donc accord pour un écart de temps dans les deux sites et les mesures reflètent probablement une structure océanique très appréciable.

Tant qu'aux stations de Sadler, il semble y avoir certains problèmes. Evidemment sa mesure la plus intéressante est 182(100) à la station 1; son courantomètre devait se trouver dans une région où la marée et le courant moyen sont à leur extrême. Nous sommes à même de remarquer dans la figure 23 (ou 14) la force et la constance du courant moyen qui se manifestent à un niveau fort élevé au cours des observations. Les courants de marée eux-mêmes sont très intenses bien qu'il n'y ait aucune raison a priori pour qu'ils soient à leur plus fort là où le courant moyen est le plus intense. Les résidus, qui sont une mesure de bruit ambiant, sont aussi très intenses et nous allons y retourner plus tard pour voir ce qu'ils contiennent. De toutes façons les résultats des analyses harmoniques et des calculs d'admittance semblent indiquer que les données recueillies à ce point sont de qualité acceptable.

Les difficultés réelles commencent au site 237(5) de sa station 2. Le diagramme d'analyse (Fig. 24) ne semble indiquer rien d'anormal mais la phase de M_2 notée dans le Tableau 7 (36°) diffère de 22° (45 minutes) de la station installée 5 mètres plus bas. Bien qu'il y ait évidence de gradient de temps dans la colonne verticale, une différence de 45 minutes en 5 mètres semble tout-à-fait inouïe et pourrait s'expliquer beaucoup mieux par une erreur accidentelle dans le mesure de temps. Si nous retournons au Tableau 5, nous notons qu'à la station 2, les courantomètres à 5, 10, 50 et 100 mètres semblent avoir été installés et retirés en même temps. D'autre part le nombre d'heures d'observations à 237(5) est de 931 heures alors qu'aux autres, elle est de 933 heures. Ceci nous porte à croire qu'il y a eu un certain délai dans le début des observations du courantomètre à ce site et peut-être quelques observations de perdues à la fin. Par conséquent il se peut que le début de l'enregistrement ne corresponde pas à l'heure indiquée. D'autre part les cohérences dans le Tableau 3 pour cet enregistrement sont aussi bonnes que celles des autres courantomètres appartenant au même groupe; il n'y a donc pas eu de données de perdues au cours de la lecture et nous devons considérer cet enregistrement comme étant de bonne qualité. En raison de tout ceci, nous avons augmenté la phase de M_2 de 20° (ce qui équivaut à un retard de temps de 40 minutes) que nous avons inscrite en parenthèses dans le

Tableau 3. De cette façon les phases à 5 et 10 mètres deviennent quasi-simultanées comme il en était le cas pour Chow aux stations 232(2.25) et 233(7.25) qui, elles aussi, étaient séparées par 5 mètres de profondeur.

Nous avons encore plus de difficulté avec les stations 193(10) et 201(100) de la station 3. Nous commençons par la dernière car il est plus facile de détecter la difficulté. Les résidus de la figure 33 contiennent des oscillations violentes et régulières du même ordre de grandeur que les observations. J'ai étudié cet enrégistrement dans une de nos notes techniques (Godin, 1976) et j'ai pu conclure qu'au moins trois heures d'observations ont été perdues graduellement au cours de l'enregistrement. Par conséquent l'analyse harmonique sur l'ensemble des données ne peut pas réussir. Nous avons fait un calcul d'admittance sur les 216 premières heures d'observations et déduit une valeur de M_2 de

$$M = 32 \text{ cm/sec} \quad m = -6 \text{ cm/sec} \quad \theta = 229 \quad g = 5^\circ$$

qui ne semble pas trop plausible. Nous avons donc décidé d'abandonner ce site, du moins au point de vue de la marée. Nous avons quand même utilisé les mêmes données pour calculer le courant moyen et son spectre de puissance entre 0 et 1 cycle/24 heures; les valeurs, obtenues ne peuvent pas trop être affectées par la perte de quelques heures d'observations.

Le site 193(10) est plus difficile car il se peut que les données présentées par Sadler soient authentiques. Toutefois si elles sont vraies, elles sont bien déroutantes, surtout au point de vue orientation. Une raison pour laquelle l'orientation mesurée peut être fausse est qu'il existe une anomalie magnétique très forte dans le voisinage de la station 3, qui n'a pas été décelée. Par conséquent nous ne savons pas qu'en faire. Etrangement la station 3 est un site de grand intérêt et il est possible qu'on y trouve un contre-courant dans les grandes profondeurs; de plus, des mesures plus sûres de l'orientation près de la surface aideraient à décider de la simplicité ou de la complexité du mouvement d'eau dans cette section du Détroit de Robeson.

Les analyses spectrales (Figs. 33 à 50) sont moins délicates puisqu'elles sont moins précises et donnent tout au plus une idée générale de la structure spectrale des données. Il est intéressant de suivre l'évolution de S_- et S_+ avec la profondeur. A la surface S_+ tend à dépasser S_- ; graduellement à mesure que la profondeur augmente, S_- augmente et finit par dépasser S_+ , ce qui indique que les courants tendent à tourner à droite dans l'intérieur de la masse d'eau. A mesure qu'on se rapproche du fond, les choses se mettent à changer et le courant reacquiète la tendance à tourner vers la gauche. Les spectres de puissance indiquent aussi que l'énergie des courants se trouve concentrée surtout dans la bande des marées. Les coefficients de rotation et de stabilité aident aussi à suivre le sens de rotation des courants et leur tendance à tourner ou à demeurer fixes.

Nous allons maintenant essayer de synthétiser l'information analytique recueillie sous forme de diagrammes établis dans l'horizontale et la verticale. Nous allons nous rendre compte très vite qu'en dépit de ce qui semble un échantillonnage très intensif des courants à différentes profondeurs et à différents endroits, l'ensemble des données faillit à suppléer une structure de courants dans la verticale et l'horizontale, dénuée d'ambiguïtés. En dépit de ceci nous allons tracer des contours d'amplitude, d'orientation, de phase et de sens de rotation, pour tenter de recréer la structure que ces mesures ponctuelles de courant représentent, mais il n'y a pas de doute que

l'on peut élaborer une quasi infinité de telles structures hypothétiques: naturellement nous essaierons d'établir celle qui semble la plus simple et la plus naturelle.

11. SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATION PRÉLIMINAIRE

11.1 Le courant moyen

Les figures 51 à 53 montrent sous diverses orientations le courant moyen calculé pour les six stations. Deux points saillants émergent:

- a) le courant augmente de l'est à l'ouest et
- b) le courant tend à tourner vers la droite si on le suit de la surface vers le fonds.

Par exemple le courant moyen mesuré dans les trois stations de Chow à 50 mètres vont de 4.2 cm/sec à 10.4 cm/sec de l'est à l'ouest. Au niveau de 100 mètres, dans les trois stations de Sadler, le courant moyen va de 4.6 à 42.4 cm/sec. Tant qu'à l'orientation elle varie à la station 2 de Chow de 260° à 2.25 mètres à 235° à 75 mètres alors qu'à la station 1 de Sadler elle varie de 260° à 212° entre 5 et 650 mètres.

Le courant moyen augmente aussi de la surface vers la thermocline (excepté la station 3 de Sadler); il semble donc que la majeure partie du transport unidimensionnel prend place au niveau de celle-ci. Nous avons hésité bien longtemps avant d'accepter les mesures de Sadler à la station 3 comme valables. Tout d'abord les courants moyens que nous calculons sont en conflit direct avec ceux que Sadler représente dans la figure 63 (p. 111) de son rapport; toutefois nos valeurs ont été calculées à partir des mêmes données que les siennes à l'aide de programmes bien établis. Nous savons aussi que le courantomètre à 100 mètres a mal fonctionné et qu'il ne donne pas de données fiables, du moins dans la bande des marées, bien qu'il devrait suppléer une valeur plus ou moins adéquate du courant moyen. Tant qu'au courantomètre à 10 mètres à ce site, il semble avoir fonctionné normalement bien que les orientations qu'il nous donne pour le courant moyen et la marée semi-diurne sont définitivement bizarres (mais elles pourraient bien être vraies).

On ne doit pas non plus considérer les mesures du courant moyen à 500 et 600 mètres à sa station 2 comme des mesures définitives et stables de cette quantité: l'inspection de la figure 12 et des composantes X et Y du courant moyen à ces profondeurs indique que celui-ci est faible et variable à ces profondeurs et qu'une moyenne sur un intervalle de quelques 35 jours donne tout au plus une "valeur accidentelle", qui ne peut pas être considérée comme une mesure définitive du flot persistant à cet profondeur. De même, l'inspection de la figure 14 montre que la même chose se passe à la station 3 de Sadler à 100 mètres et que des mesures plus prolongées donneraient probablement une valeur du courant moyen assez différente de celle obtenue. La seule mesure anormale du courant moyen qui devrait retenir notre attention est celle de la station 3 de Sadler à 10 mètres. La figure 13, dans laquelle on peut suivre l'évolution des composantes X et Y du courant moyen indique que ce courant est fort et effectivement constant: par conséquent la mesure qu'on en a faite devrait être considérée comme fiable. Si vraiment il n'y a pas eu d'erreur dans l'orientation du courantomètre installé à ce site, nous nous voyons en présence d'un courant moyen assez fort, dirigé résolument vers la

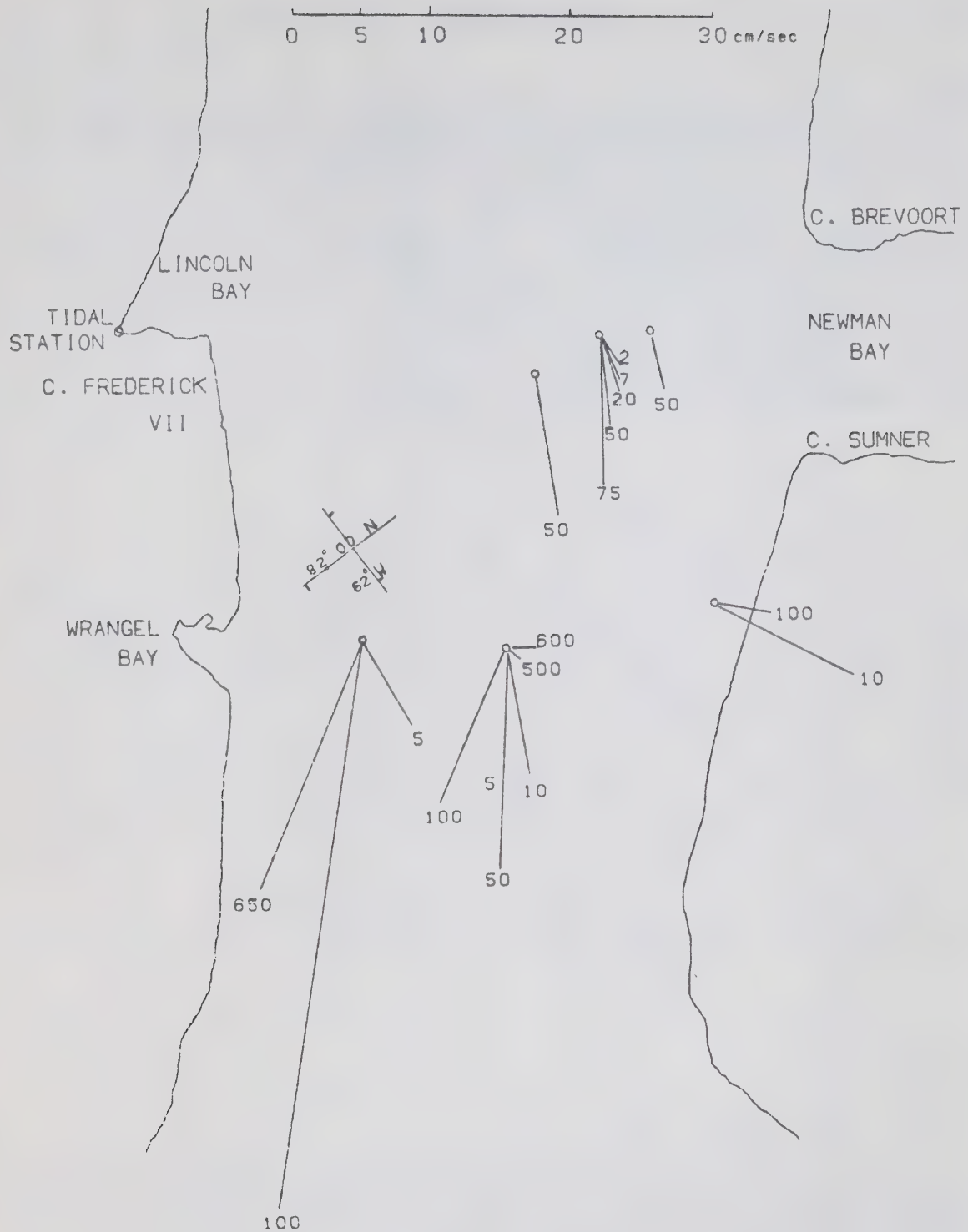


Fig. 51. Vecteurs des courants moyens mesurés par Chow et Sadler. Le chiffre au bout du vecteur indique la profondeur à laquelle il correspond. Le courant moyen à 5 mètres à la station 2 de Sadler est presque parallèle à celui à 50 mètres mais il est moins intense. Les orientations à la station 3 sont problématiques.

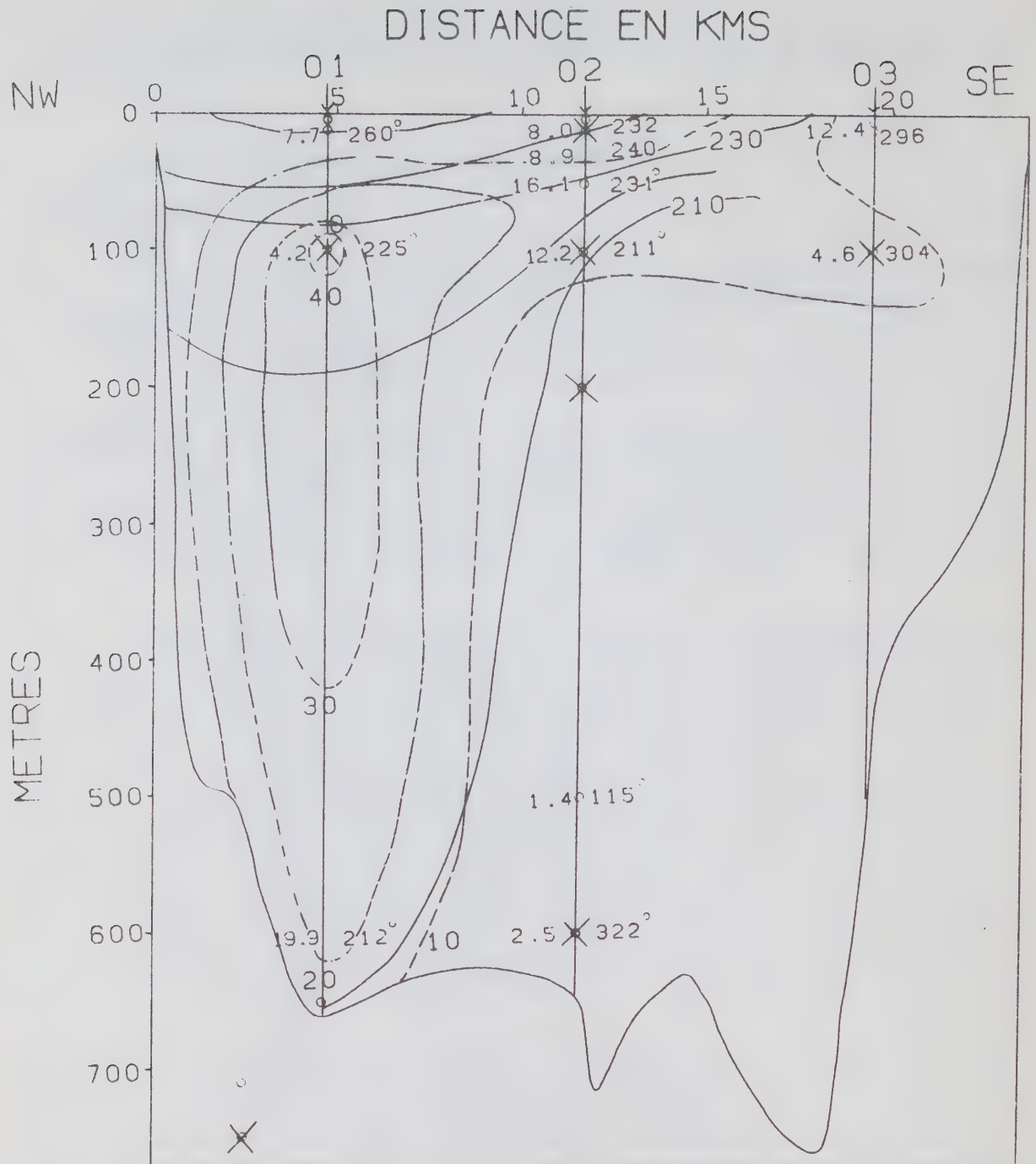


Fig. 53. Courants moyens dans la verticale pour la section de Chow. Les nombres des courantmètres ont été omis. Les courants moyens sont donnés par une amplitude en cm/sec et une orientation (trigonométrique). Nous avons tracé des contours d'intensité (pointillés) et d'orientation (continus). Nous n'avons pas pu pousser ceux-ci du côté du Groenland. Nous n'avons pas hésité à tirer le contour de 30 cm/sec jusqu'à 400 mètres dans la station 1 car des calculs supplémentaires de cohérence entre les enregistrements à 100 et 650 mètres indiquent une bonne cohérence entre les courants moyens à ces deux profondeurs: celui-ci doit donc s'étendre sur toute la verticale.

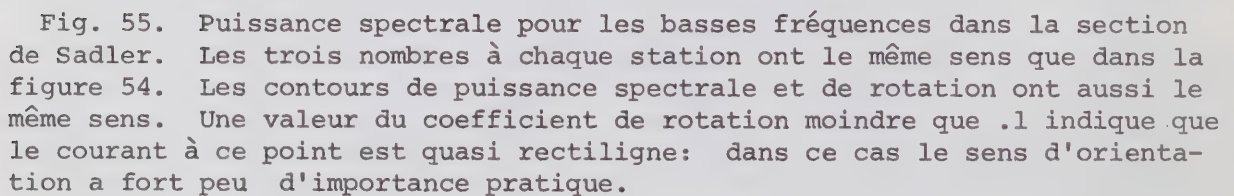
côte. Ceci indiquerait alors une circulation de surface assez compliquée du côté du Greenland.

Nous devons noter finalement l'intensité du courant mesuré à la station 1 de Sadler à 100 mètres; elle semble définitivement authentique et les mesures de Chow au nord ainsi que les mesures en surface et en profondeur aux station 1 et 2 de Sadler semblent toutes converger pour indiquer un flot d'eau arctique très intense le long du Canada et dirigé vers le sud. La figure 53 qui montre dans la verticale les mesures de Sadler semble indiquer, en dépit du petit nombre d'observations, qu'un flot très considérable sur toute la profondeur et qui s'étend sur une largeur de près de 10 kilomètres se dirige vers le sud; la direction de ce flot tourne rapidement puis plus lentement vers la droite quand on va de la surface vers le fonds. La section de Chow (Fig. 52) qui n'illustre que quelques 75 mètres indique quand même que le flot augmente rapidement de la surface vers la thermocline et tourne à droite à mesure que la profondeur augmente.

11.2 Les fluctuations lentes du courant moyen

Une inspection des composantes X et Y du filtrat passe-bas dans les figures 15 à 32 indique que le courant moyen fluctue appréciablement en amplitude et direction au cours des observations. Les analyses spectrales illustrées dans les figures 33 à 50 nous donnent, dans la bande des basses fréquences, une mesure de l'intensité de ces fluctuations à long terme (0 à 1 cycle/24 heures) et de plus, nous indiquent leur sens prédominant de rotation et leur orientation. Les figures 54 et 55 montrent la distribution de ces mesures dans les sections verticales de Chow et de Sadler. Nous avons tracé dans les figures des lignes d'intensité constante et nous avons séparé les domaines dans lesquels les courants tournent à droite ou à gauche. Pour interpréter les intensités nous notons qu'une densité de $1351 \text{ (cm/sec)}^2 / \text{(cycle/heure)}$ sur une bande de .0417 c/heure, telle qu'observée au site 234(5) (station 1 de Sadler), indique des fluctuations à long terme de l'ordre de 8 cm/sec. Comme toujours, les lignes que nous avons tracées peuvent être considérées comme arbitraires à un très haut degré mais comme nous l'avons dit, nous recherchons toujours la structure la plus simple et la plus plausible.

Avec ces réservations, nous notons dans la section de Sadler que les fluctuations lentes les plus intenses se trouvent là où le courant moyen et les courants de marées sont à leur plus intenses. D'autre part le maximum de ces fluctuations se trouve à 650 mètres et non pas à 100 mètres. Sadler a eu quelque réticence à accepter les données de son courantomètre à 650 mètres mais les analyses que nous en avons faites donnent des résultats très raisonnables et nous serions prêts à accepter cette mesure de la fluctuation on lente à 650 mètres; ce qui voudrait dire que des fluctuations du courant moyen de l'ordre de 10 cm/sec peuvent prendre place à ce niveau. En fait, on peut voir l'évidence de telles fluctuations dans les composantes X et Y du filtrat passe-bas illustré dans la figure 24. Nous avons retenu la lecture au site 201(100) de la station 3 où il semble y avoir quelques 7 cm/sec de fluctuations lente dans le courant moyen à ce site. Un inspection de la figure 32 indique que le courant moyen est très variable à ce site et le spectre que nous venons de mentionner est une mesure de cette variabilité. Si tout ceci est vrai, ceci veut dire que dans le voisinage de la station 3, le régime de courant est variable et instable. Tant qu'au sens de rotation des fluctu-



ations du courant moyen, nous le considérons comme négatif dans la plus grande partie de la masse d'eau, en dépit de l'éparpillement des données. Les orientations sont en accord un peu partout et suivent de très près l'orientation du lit du Détroit. La section de Chow (Fig. 54) est moins intéressante puisque l'activité de ce genre est très faible au niveau où il a placé ses courantomètres.

11.3 La marée semidiurne

Nous pénétrons maintenant dans la zone la plus énergétique du mouvement des courants. La figure 57 montre le spectre de puissance de la bande semidiurne dans la section de Sadler. L'intensité maximum encore une fois se trouve dans la masse d'eau. Les courants ont une forte tendance à tourner à droite au coeur de la masse d'eau. Le spectre de la bande semidiurne dans la section de Chow (Fig. 56) indique le même gradient d'intensité verticale et une tendance des courants à tourner vers la gauche près de la surface. Si nous regardons maintenant l'onde de marée semidiurne M_2 qui est la composante la plus importante de cette bande, nous pouvons d'abord tenter d'établir des cartes cotidiales à l'aide des données côtières (Fig. 58). D'après notre interprétation des données, une onde semidiurne entre dans le Détroit de Robeson et rencontre quelque part dans le Détroit de Nares l'onde semidiurne qui a été émise par la mer de Baffin. L'onde semidiurne se propage en oblique du nord ouest au sud est dans la région étudiée par Chow et Sadler.

Nous montrons les mesures de M_2 dans l'horizontale (Fig. 59): soient le demi-grand axe, la profondeur et la phase de Greenwich. Nous avons aussi calculé la moyenne verticale pondérée des mesures de courant car nous avons l'impression que les valeurs mesurées sont assez solides pour permettre un tel calcul. Pour obtenir ces moyennes, il nous faut calculer les moyennes pondérées des vecteurs,

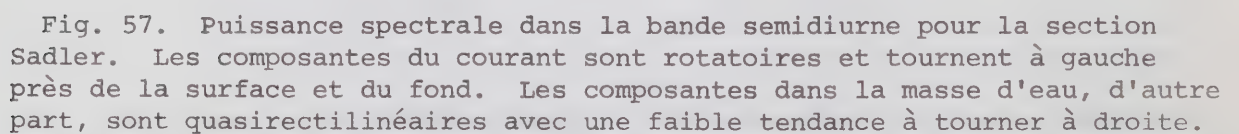
$$\underline{w}_j \text{ et } \underline{w}_{-j}$$

(voir Section A) le long de la colonne d'eau. Ceci n'est possible que lorsqu'on a construit des contours plausibles dans la section verticale pour les variables:

$$|\underline{w}_j|, \quad \arg \underline{w}_j, \quad |\underline{w}_{-j}|, \quad \arg \underline{w}_{-j}$$

dérivées de l'analyse. Ceci explique pourquoi il nous a été possible de donner une moyenne pondérée pour la station 3 de Sadler où seule la lecture à 10 mètres est acceptable: les contours dérivés des autres section peuvent être extrapolés pour donner une structure conjecturale de ces paramètres le long de la colonne d'eau à la station 3. Les moyennes pondérées sont données dans le Tableau 9.

Nous voyons que le courant dû à M_2 , dans la section de Sadler (Fig. 61), diminue de l'ouest à l'est et tourne de plus en plus vers la gauche lorsque nous suivons cette direction. Les phases des courants près des deux côtes sont aussi en retard de quelques 12 minutes de temps par rapport au courant au centre du lit. La moyenne pondérée pour la station 2 de Chow ne s'applique que pour les premiers 75 mètres. Si les courants à cette station suivent



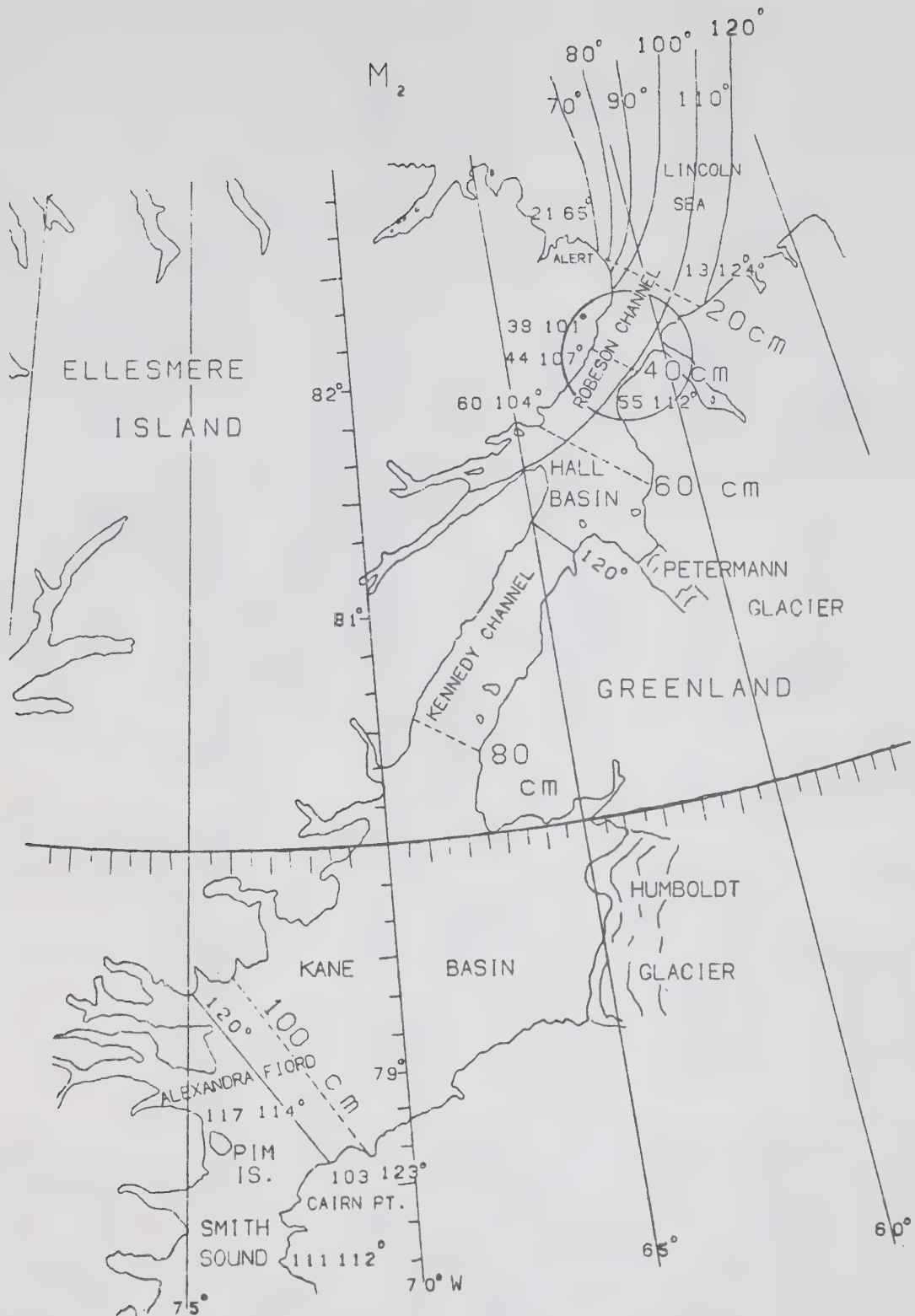


Fig. 58. Carte cotidale pour l'onde M_2 , qui contribue le plus fortement à la puissance spectrale dans la bande semidiurne. Cette carte est basée sur les données contenues dans le Tableau 6. Nous avons tracé des lignes de cophase (continues) et de coamplitude (pointillées).

Tableau 9. Moyenne pondérée dans la colonne verticale de la composante semidiurne M_2 du courant dans le Détroit de Robeson.

Section de Sadler	Station 1			Station 2			Station 3		
	M cm/sec	m cm/sec	θ degrés	M cm/sec	m cm/sec	θ degrés	M cm/sec	m cm/sec	θ degrés
	26	1.4	215°	20	1.5	228°	12	4.3	245°
			32°			26°			32°
Section de Chow (sur la profondeur 0-75 mètres)	Station 2			Station 2					
	M cm/sec	m cm/sec	θ degrés	M cm/sec	m cm/sec	θ degrés			
	18	1	237°			24°			

l'allure des courants aux stations 1 et 2 de Sadler, ceci indiquerait que la moyenne pondérée de la phase pour la colonne totale de la station 2 de Chow devrait être moindre que 24° . Dans ce cas nous voyons qu'il y aurait un retard net des courants au sud, ce qui ne contredirait pas l'hypothèse de la propagation de la marée du nord au sud.

Les mesures de M_2 à tous les sites occupés (Figs. 60 et 61) donne un aperçu plutôt consistant de la structure des courants semidiurnes. Nous voyons que les phases des courants diminuent avec l'augmentation de profondeur: les courants tournent d'abord à partir du fond quand on va du régime de flot à celui de jusant ou vice versa. L'orientation des courants tend à virer vers la droite à mesure qu'on va de la surface vers la masse centrale d'eau. Tant qu'aux intensités, elles augmentent de la surface à la thermocline et atteignent des valeurs de l'ordre de 35 cm/sec au site 234(75) à la station 2 de Chow. On retrouve de telles vitesses à toutes les stations occupées aux profondeurs de 50, 75 et 100 mètres; ce qui indique que les courants de marée semidiurnes sont très appréciables à l'intérieur de la masse d'eau sur toute la largeur du Détroit de Robeson et doivent influencer définitivement les échanges d'eau.

Dans la section de Sadler, les phases diminuent très rapidement sur les premiers cent mètres. Le signe du demi-petit axe correspond au sens de rotation des courants et supporte les conclusions que nous avons faites à ce sujet durant l'inspection du spectre de puissance semidiurne. La section de Chow (Fig. 60) donne à peu près la même information que celle de Sadler dans le niveau de surface.

11.4 La bande diurne

Nous montrons dans les figures 62 et 63 les mesures du spectre de la bande diurne pour les sections de Chow et de Sadler. Les intensités sont fortes et nous pouvons tracer sans ambiguïté les zones de rotation à droite ou à gauche. Cette fois-ci il semble assez certain que la rotation du courant au coeur de la masse d'eau est à droite. Le maximum d'intensité s'y trouve là aussi mais la lecture au site 201(100) nous force à tirer le contour de ce côté; toutefois nous savons fort bien que cette lecture a bonne chance d'être fausse. La section de Chow (Fig. 62) est aussi explicite: elle indique des courants qui vont à la gauche à la surface et à droite, plus bas. L'intensité augmente aussi dans la verticale.

Les analyses harmoniques et la théorie des marées nous permet de regarder de beaucoup plus près cette bande diurne du spectre et d'y suivre en particulier l'évolution des phases dans la verticale et l'horizontale. Afin de commencer ce travail nous devons d'abord tenter de dresser des cartes cotidales qui donnent une idée générale de la propagation de la marée dans l'aire couverte par les mesures de courant: nous nous servons dans ce but des données contenues dans le Tableau 6. La figure 64 montre le système de lignes cotidales que nous avons construit pour essayer d'expliquer les observations sur l'onde diurne K_1 . Cette carte semble indiquer qu'une onde diurne se propage vers le nord à partir de la mer de Baffin et rencontre une autre onde diurne qui circule le long de l'océan arctique de l'est à l'ouest. A vrai dire nous ne sommes pas satisfait de cette carte qui semble inutilement compliquée mais qui est nécessaire si nous voulons accepter toutes les données comme vraies.

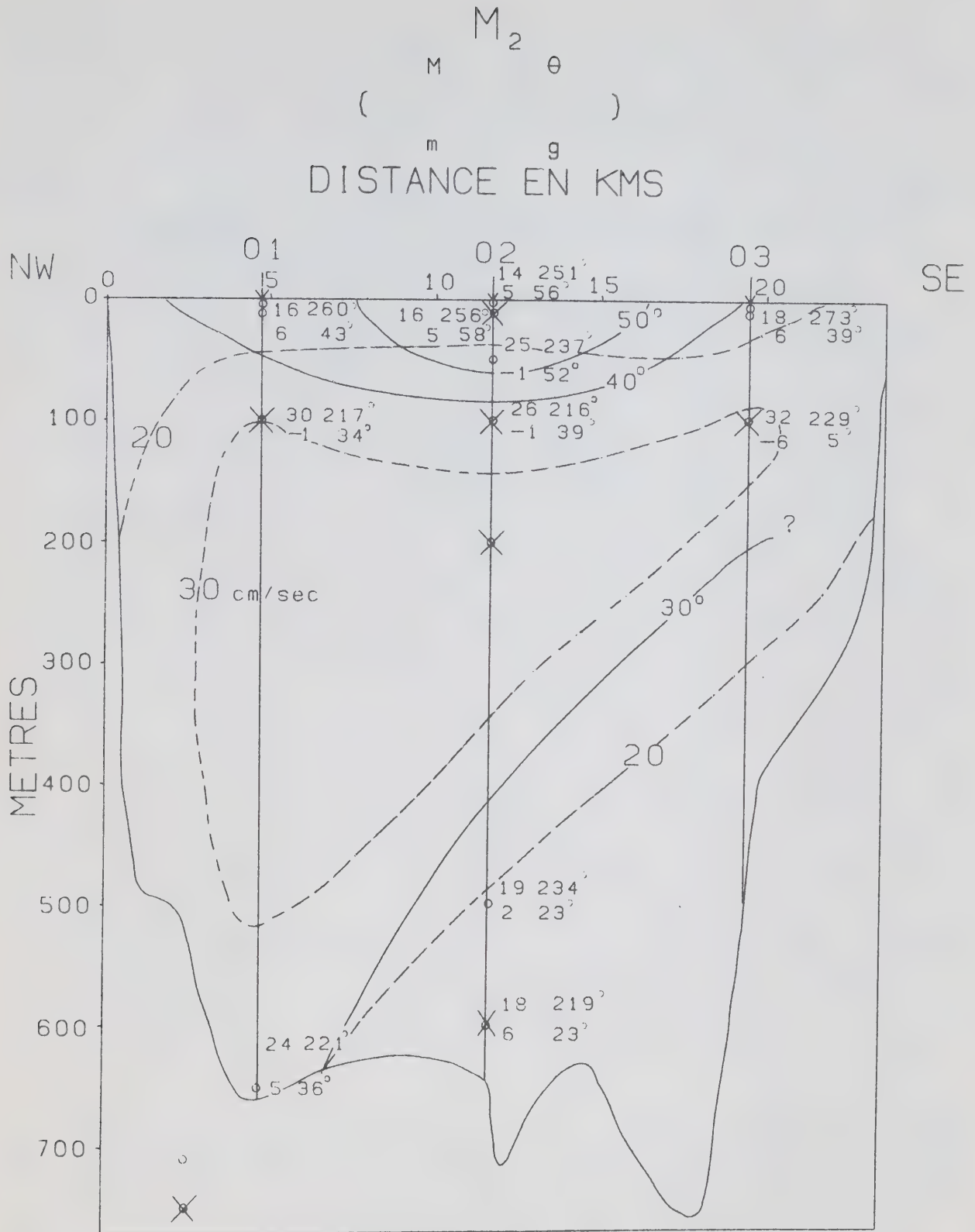
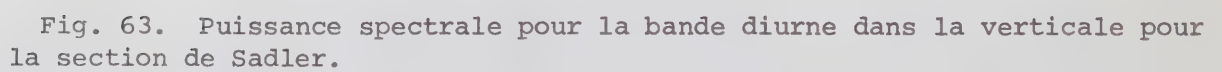


Fig. 61. Éléments de l'ellipse composante de M_2 dans la section verticale de Sadler. En dépit de certaines irrégularités dans les analyses, il semble que le courant semidiurne dû à M_2 est assez homogène dans le corps de la masse d'eau. Nous avons tenté de tracer des contours de vitesse et de phase.



Si nous regardons celles-ci de plus près, nous nous rendons compte que les données de Foulke Fjord, Rennselaer, Thank God Harbour et Cape Bryant ont été prises à la fin du siècle dernier alors qu'il n'existait pas de radio et qu'il était effectivement impossible d'être sûr du temps employé. Il se peut donc que les phases données pour ces sites soient appréciablement fausses. Celle du Cape Bryant nous embarrasse particulièrement et nous serions très heureux si elle était de l'ordre de 310° plutôt que 340° . D'autre part les données des autres stations ont été recueillies plus récemment et nous pouvons contrôler leur véracité. Si par conséquent, nous ne conservons que celles-ci, nous pouvons refaire une nouvelle carte cotidale qui sans doute, s'appuie sur un nombre infime de données, mais qui est plus simple. Physiquement la situation est la même qu'auparavant: une onde diurne émerge du Détroit de Robeson et s'associe avec une autre onde qui se propage le long des rives de l'Océan Arctique. Cette fois-ci, l'allure des lignes cotidales est plus naturelle (Fig. 65). Si nous regardons en particulier l'aire couverte par les mesures de Chow et Sadler, nous voyons que pour cette région, la première carte suggère une simple propagation du sud ou est au nord est. Nous devons comprendre que les courants mesurés n'ont pas à refléter exactement ce mouvement supposé de l'onde locale de marée puisque la dynamique verticale et horizontale de ces mouvements peut être assez compliquée. Nous vérifions l'allure des courants mesurés en traçant le demi-grand axe de l'ellipse de K_1 aux six stations à toutes les profondeurs dans les figures 66 et 67; les lignes fines sont les lignes cotidales supposées dérivées des deux cartes cotidales hypothétiques. Si nous inspections les observations elles-mêmes, nous voyons d'abord que les phases ont une tendance définitive à augmenter de l'est à l'ouest. A 50 mètres les stations de Chow ont des phases de 148° à 160° et à 100 mètres, les stations 2 et 1 de Sadler ont des phases de 164° à 175° , ce qui indique que les maxima des courants diurnes prennent place une heure plus tard dans la direction indiquée. Nous avons inscrit à l'origine de quelques stations, les phases correspondantes de la marée verticale déduites des cartes cotidales; nous voyons que dans les deux cas, il n'y a qu'une très minime indication d'un mouvement de l'est à l'ouest. Sans l'aide d'un modèle dynamique, nous ne pouvons rien dire de plus sur la structure de la marée diurne dans cette région. Si nous nous tournons maintenant vers le graphique des mêmes données de courant dans la section verticale de Sadler (Fig. 69), nous voyons que les courants de marée diurnes ont leur maxima au même endroit où le courant moyen a son maximum. Le temps des courants maxima augmente de l'est à l'ouest à tous les niveaux. D'autre part ces temps augmentent de la surface vers le centre de la masse d'eau pour ensuite rediminuer vers le fonds: ce qui veut dire que le courant diurne tourne d'abord à la surface et au fonds avant de tourner au coeur de la masse d'eau. La section de Chow (Fig. 68) indique une augmentation de phase entre 2.25 mètres et 25 mètres et une diminution par après.

Nous devons conclure que la structure du mouvement vertical et horizontal de la marée diurne n'est pas très claire dans le Détroit de Robeson, à partir des mesures disponibles. Sans doute l'onde diurne n'est pas très forte dans ce coin des océans mais il est quand même un peu surprenant que les mesures qu'on en a faites soient si éparpillées et presque contradictoires.

11.5 Les oscillations de haute fréquence

Les figures 70 à 77 donnent les spectres de haute fréquence qui

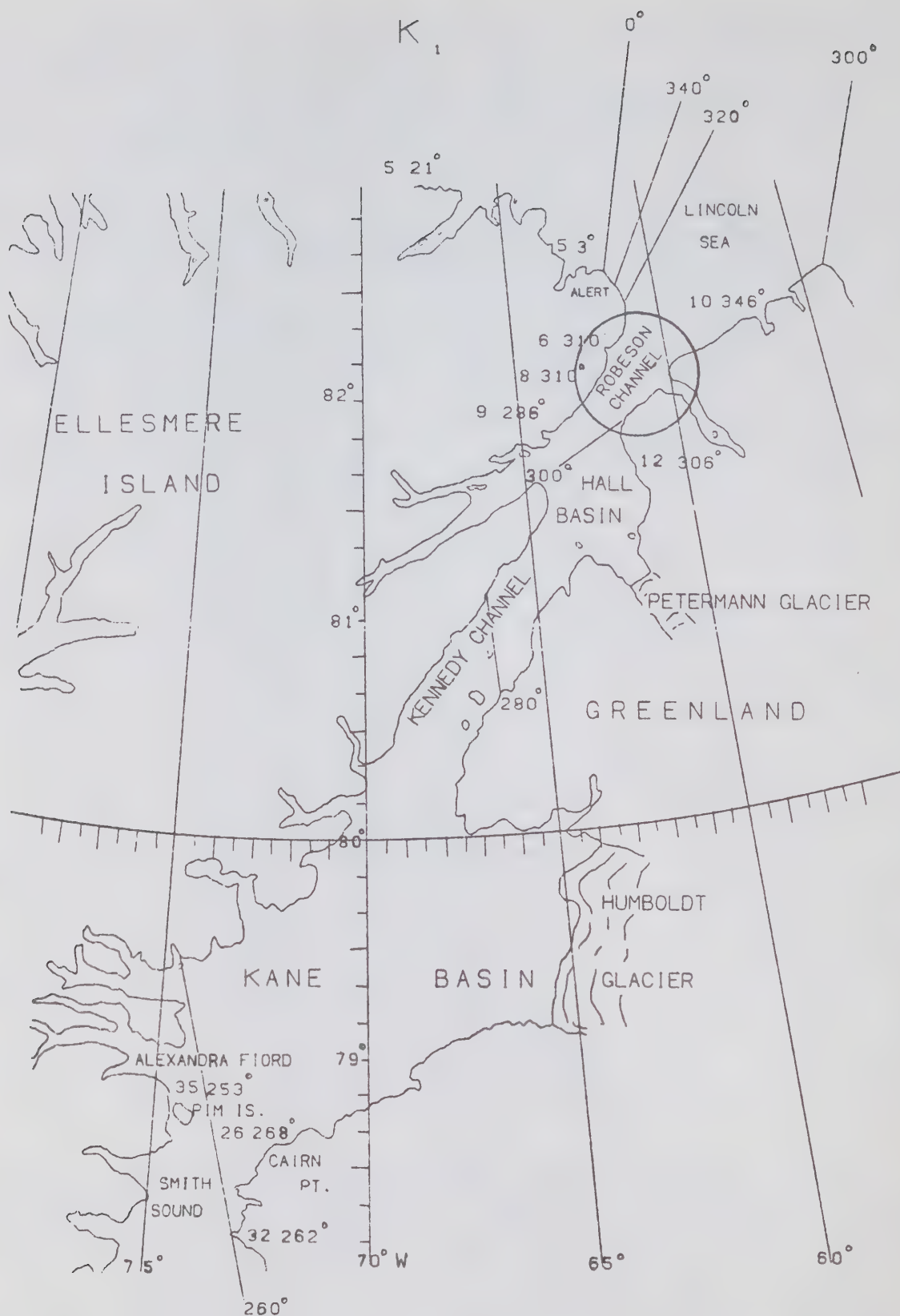


Fig. 65. Carte cotidale pour l'onde K_1 basée exclusivement sur les données fiables contenues dans le Tableau 6.

$$K_1$$

$$\begin{pmatrix} M & \theta \\ m & g \end{pmatrix}$$

DISTANCE EN KMS

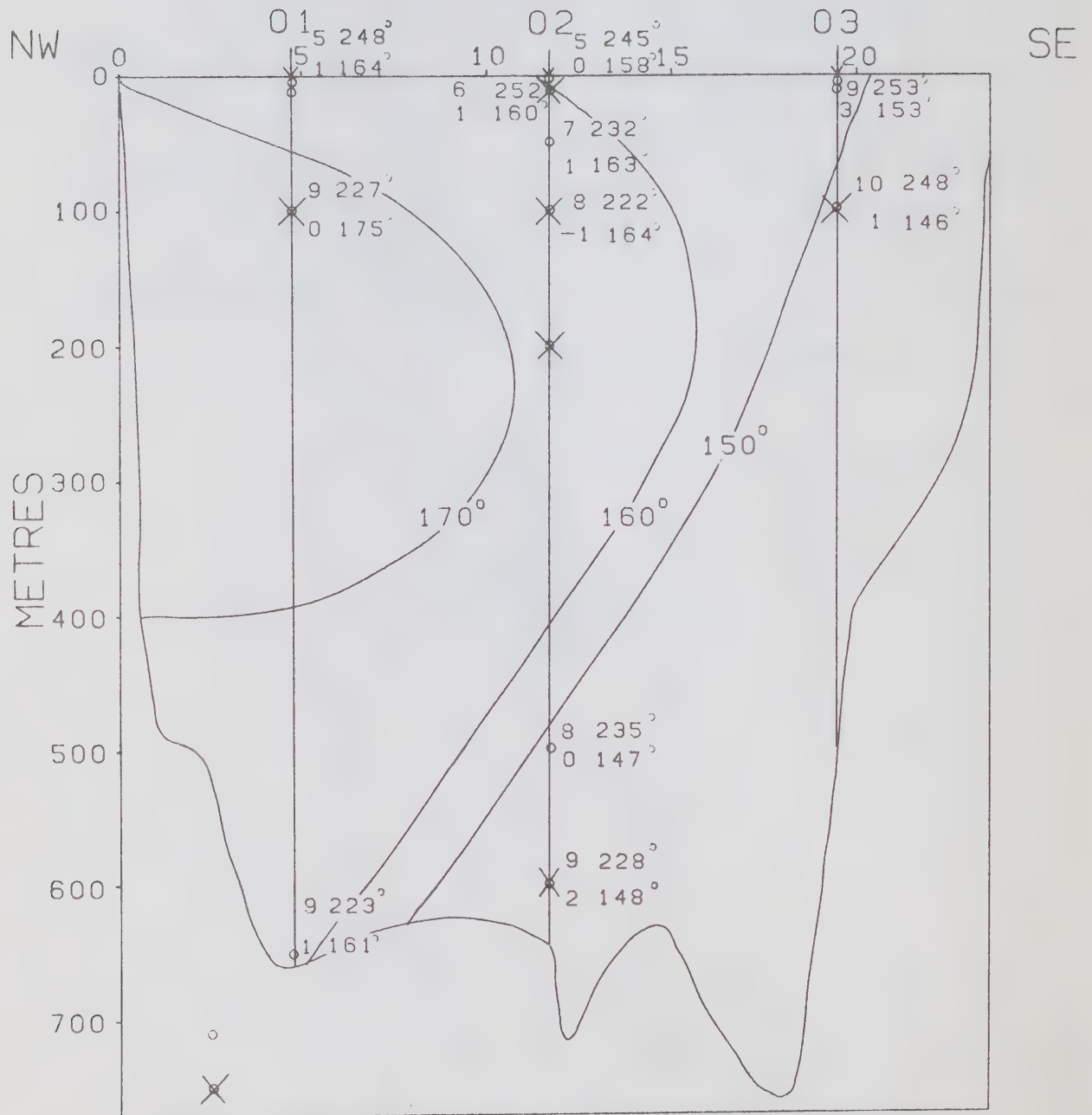


Fig. 69. Éléments de l'ellipse composante de K_1 dans la verticale pour la section de Sadler.

vont des oscillations terdiurnes aux sixtediurnes dans les sections de Chow et de Sadler. L'énergie semble diminuer avec l'augmentation de fréquence mais à part ça les sections se ressemblent toutes et ressemblent aussi à la bande semidiurne. Les courants de ce type tendent à tourner vers la droite dans la masse d'eau, avec une tendance occasionnelle à tourner à gauche dans certaines portions de la surface ou du fond.

Les orientations de l'ellipse sont un peu erratiques à cause de la faiblesse du signal. Les oscillations les plus fortes ont été notées au niveau de 100 mètres et sont de l'ordre de 5 cm/sec dans la bande terdiurne. Ces valeurs sont reflétées par les amplitudes de l'onde composante MK_3 détectées par les analyses harmoniques aux sites 182(100) et 235(100) de Sadler; ces analyses confirment aussi la tendance rotative plutôt qu'oscillatoire de ce type de courant aux niveaux mentionnés.

Nous pouvons donc conclure que les courants de marées peuvent atteindre quelque chose comme 45 cm/sec dans le Détroit de Robeson, la composante semidiurne étant la plus importante. Si l'on superpose à ceci un courant moyen de l'ordre de 42 cm/sec dans le côté ouest du Détroit, on doit s'attendre à mesurer des courants totaux de l'ordre de 90 cm/sec. Si l'on ajoute des fluctuations lentes de l'ordre de 10 cm/sec, les courants totaux sont de l'ordre 100 cm/sec.

Nous avons négligé jusqu'ici les fluctuations à courte période (moindre qu'un sixième de jour) que nous avons purgées des données avant même d'en commencer l'étude parce qu'elles nous auraient amené trop loin de notre domaine d'intérêt, soit la marée. De telles oscillations vont se superposer au courant maximum que nous avons mentionné, soit 1 mètre/sec, on doit donc s'attendre à mesurer des courants qui pourraient atteindre 2 mètres/sec sur de courts intervalles.

11.6 Spectres croisés entre différents sites de courantomètres

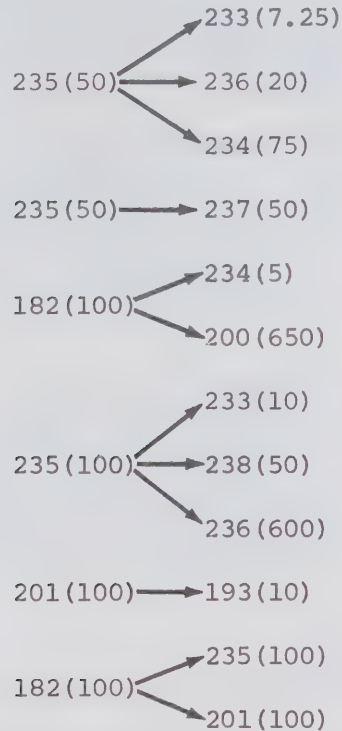
Nous nous sommes servi jusqu'ici de spectres croisés tout au plus pour obtenir des estimés plus stables des composantes diurnes et semidiurnes des courants de marée afin d'établir le Tableau 7. Maintenant nous voulons calculer les spectres croisés entre deux sites de mesures de courant afin de vérifier le degré de parenté qui existe entre ces deux sites. Comme la Section A indique, ces spectres croisés sont loin d'être simples et de plus, ne sont pas d'interprétation facile. En effet un spectre croisé entre deux suites vectorielles nous donnera les quantités suivantes:

- a) la cohérence scalaire,
- b) l'admittance scalaire,
- c) la cohérence vectorielle,
- d) l'admittance vectorielle et
- e) le coefficient de corrélation totale.

Les mesures de cohérence et d'admittance dérivent du spectre croisé et des spectres de puissance. Le spectre croisé scalaire mesure la relation entre les composantes polarisées dans la même direction des courants input et output; le spectre croisé vectoriel mesure la relation entre les composantes polarisées dans des directions opposées. Dans la convention que nous avons choisie, le spectre croisé vectoriel mesure la corrélation entre

les composantes polarisées à droite du courant input et des composantes polarisées à gauche pour le courant output pour les fréquences positives et vice versa pour les fréquences négatives. Le coefficient de corrélation totale est le produit scalaire normalisé des composantes vectorielle de Fourier des deux suites de vecteurs et donne donc une mesure du degré de corrélation totale de ces deux suites. Il n'y a pas de limite évidemment aux choix de paires: nous nous limitons à comparer des courantomètres sur la même ligne verticale ou sur le même niveau horizontal.

Notre choix de paires est le suivant:



Nous donnons les cohérences et la corrélation totale pour les 7 premières bandes de fréquence dans le Tableau 10; nous notons en même temps le nombre d'heures d'observations simultanées utilisées puisque les estimés deviennent de plus en plus fiables à mesure que les observations sont prolongées.

Nous regardons d'abord les résultats le long de la verticale à la station 2 de Chow; nous voyons que les cohérences et la corrélation totale sont faibles dans les basses fréquences mais qu'elles sont à leur meilleur entre 50 et 75 mètres, une indication qu'il y a une certaine homogénéité entre le courant moyen et ses oscillations à mesure que l'on avance vers la couche profonde. Tant qu'à la marée diurne, la corrélation est à son maximum entre 50 et 20 mètres. Nous nous souvenons que nous avons eu beaucoup de difficulté à comprendre le régime de courants diurnes. Nous notons qu'entre 50 et 75 mètres, les cohérences scalaires et vectorielles pour les fréquences négatives sont du même ordre que les cohérences entre les niveaux 50 et 20 mètres pour toutes les fréquences alors que les cohérences entre 50 et 75 mètres pour les fréquences positives sont décidément plus faibles. Ceci indique que les composantes polarisées à droite entre 50 et 75 mètres et les cohérences polarisées à droite à 50 mètres et à gauche à 75 mètres sont plus fortes. Nous

Tableau 10. Cohérences et corrélation totale entre des paires de suites de mesures de courant à diverses profondeurs sur une même verticale ou à une profondeur commune.

Paire	Bande cycle/jour	Cohérence scalaire fréquence		Cohérence vectorielle fréquence		Corrélation totale
		négative	positive	négative	positive	
235 (50)	0	.306	.141	.329	.245	.231
et	1	.887	.899	.932	.876	.894
233 (7.25)	2	.928	.962	.949	.923	.930
	3	.744	.739	.653	.625	.701
444	4	.651	.445	.236	.136	.541
heures	5	.613	.308	.158	.217	.438
	6	.371	.650	.479	.560	.499
235 (50)	0	.433	.354	.617	.347	.395
et	1	.934	.954	.959	.925	.946
236 (20)	2	.963	.984	.952	.964	.961
	3	.850	.706	.651	.577	.813
443	4	.831	.703	.466	.519	.792
heures	5	.746	.721	.337	.197	.724
	6	.802	.758	.623	.722	.754
235 (50)	0	.425	.577	.315	.577	.498
et	1	.930	.797	.918	.781	.834
234 (75)	2	.951	.982	.974	.954	.880
	3	.781	.554	.422	.219	.727
444	4	.455	.418	.381	.339	.445
heures	5	.445	.207	.365	.238	.329
	6	.158	.044	.125	.301	.122
235 (50)	0	.373	.617	.387	.463	.492
et	1	.866	.954	.841	.947	.917
237 (50)	2	.951	.982	.922	.971	.972
	3	.819	.795	.786	.595	.782
346	4	.764	.288	.589	.452	.666
heures	5	.392	.078	.635	.475	.250
	6	.361	.321	.407	.346	.338
182 (100)	0	.439	.332	.534	.230	.408
et	1	.443	.701	.628	.700	.571
234 (5)	2	.738	.960	.793	.935	.827
	3	.134	.175	.049	.341	.145
983	4	.439	.110	.183	.092	.347
heures	5	.208	.201	.097	.213	.205
	6	.321	.373	.373	.182	.343

Tableau 10 (conclu).

182(100)	0	.750	.612	.749	.651	.703
et	1	.728	.743	.633	.829	.731
200(650)	2	.918	.956	.944	.916	.918
	3	.278	.238	.305	.330	.255
961	4	.071	.337	.203	.507	.149
heures	5	.524	.119	.319	.325	.387
	6	.416	.355	.069	.134	.381
235(100)	0	.687	.235	.611	.518	.446
et	1	.842	.854	.856	.845	.814
233(10)	2	.860	.984	.932	.926	.890
	3	.547	.254	.557	.541	.482
933	4	.373	.470	.294	.671	.373
heures	5	.312	.252	.189	.279	.291
	6	.184	.356	.167	.103	.229
235(100)	0	.606	.761	.467	.578	.684
et	1	.861	.885	.859	.871	.827
238(50)	2	.905	.987	.974	.930	.943
	3	.574	.332	.464	.496	.517
933	4	.455	.321	.241	.594	.419
heures	5	.151	.293	.259	.217	.192
	6	.085	.273	.307	.133	.143
235(100)	0	.339	.392	.163	.310	.363
et	1	.903	.940	.928	.906	.866
236(600)	2	.910	.988	.965	.925	.904
	3	.447	.394	.482	.482	.418
910	4	.360	.217	.464	.242	.318
heures	5	.444	.219	.032	.254	.386
	6	.211	.133	.193	.191	.189
201(100)	0	.419	.599	.551	.616	.505
et	1	.781	.875	.826	.851	.776
193(10)	2	.791	.883	.829	.835	.783
	3	.437	.459	.225	.219	.383
898	4	.350	.216	.097	.405	.240
heures	5	.236	.309	.173	.371	.231
	6	.231	.111	.267	.148	.185
182(100)	0	.536	.539	.585	.495	.522
et	1	.822	.825	.767	.834	.817
235(100)	2	.894	.980	.921	.952	.934
	3	.390	.439	.316	.408	.399
933	4	.531	.188	.391	.392	.477
heures	5	.348	.207	.274	.139	.314
	6	.184	.210	.045	.094	.189
182(100)	0	.329	.634	.403	.478	.438
et	1	.790	.754	.761	.792	.773
201(100)	2	.823	.858	.811	.856	.837
	3	.406	.255	.258	.397	.374
898	4	.340	.344	.173	.055	.340
heures	5	.214	.325	.302	.288	.231
	6	.238	.236	.172	.163	.236

voyons dans la figure 69 que le courant à 50 mètres a une faible tendance à tourner à gauche alors que celui à 75 mètres a une tendance opposée: les cohérences détectées entre ces niveaux reflètent cette situation. La corrélation totale dans la bande semidiurne atteint aussi un maximum entre 50 et 20 mètres. D'autre part le régime de cohérence est presque identique entre 50 et 20 mètres, et 50 et 75 mètres. Nous voyons qu'il y a une transition continue entre les régimes de courants entre 50 et 75 mètres alors que la corrélation totale de .88 indique que les régimes de courant sont de caractère différent. La dernière corrélation qui nous retient dans les données de Chow est celle entre les sites 235(50) et 237(50), une corrélation à un niveau commun (nous n'avons pas pu faire la même chose pour la station 3 parce que les observations n'étaient pas simultanées avec celles de 235(50)). Cette corrélation est passable dans les basses fréquences et une cohérence scalaire de .62 indique que les oscillations polarisées à gauche du courant moyen sont en assez bonne concordance entre ces niveaux. Les cohérences diurnes sont bonnes et elles sont un peu plus fortes pour les fréquences positives: nous notons que cette fois-ci nous passons d'un régime de courants presque rectilinéaires avec une faible tendance à tourner à gauche à une autre régime de courants qui ont une tendance plus forte à tourner à gauche. Les cohérences et corrélations dans la bande semidiurne sont bonnes et indiquent qu'au niveau de 50 mètres, les courants semidiurnes sont homogènes entre les stations 2 et 1 de Chow.

Nous portons maintenant notre attention vers la station 1 de Sadler ou nous nous sommes servi des lectures à 100 mètres comme point de référence. Nous voyons par les valeurs entre 5 et 100 mètres qu'il y a peu d'homogénéité entre les mouvements de courant: les seules cohérences satisfaisantes sont celles de la bande semidiurne pour les fréquences positives. Nous notons que nous passons encore une fois d'un régime quasi-rectiligne avec une faible tendance à tourner à gauche à 100 mètres à un régime un peu plus rotationnel à gauche de courant à 5 mètres. La corrélation totale pour la bande de 0 cycle/heure entre 100 et 650 mètres atteint .703 (et cela sur un intervalle de 961 heures): ceci confirme notre hypothèse que le courant moyen s'étend sur presque toute la colonne d'eau du côté ouest du Detroit et que les fluctuations qui l'affectent sont synchrones dans les grandes profondeurs. Les corrélations à la station 2 de Sadler en prenant 100 mètres comme point de référence nous indiquent que le courant moyen oscille d'une façon à peu près homogène entre 50 et 100 mètres.

La faible corrélation à 0 cycle/heure entre 100 et 600 mètres confirme encore une fois notre hypothèse que le courant moyen n'est pas homogène entre 100 et 600 mètres. Nous avons calculé la corrélation entre les stations 201(100) et 193(10) bien que nous n'ayons pas confiance à la première; les corrélations sont faibles et naturellement nous ne pouvons pas attribuer une cause physique à cette situation. Nous avons évalué finalement les corrélations entre les trois stations à 100 mètres, nous servant de 182(100) comme input; elles démontrent une certaine homogénéité des courants dans les bandes semidiurnes et diurnes et une homogénéité beaucoup moindre dans la bande des basses fréquences.

11.7 La décomposition du courant moyen en composantes déterminées par l'orientation du lit

Nous avons noté au début de cette étude que ce genre de décomposi-

ition cause des complications inutiles dans l'analyse mathématique des courants; d'autre part elle a un sens physique et nous y retournons maintenant pour suivre le flot le long et en travers du lit.

Nous considérons que le lit du Détroit de Robeson (au moins pour la section de Sadler) a une orientation qui tombe entre 220° et 235° . Nous choisissons d'abord la valeur extrême de 235° pour décomposer le courant moyen en composantes parallèle et perpendiculaire à cette direction. Le résultat de cette décomposition est illustré dans les figures 78 et 79 et nous suggère immédiatement une interprétation fort intéressante du flot moyen dans la section de Sadler. Il n'y a pas de doute qu'on peut prendre beaucoup de liberté en formant les contours mais les données elles-mêmes semblent bien supporter ceux que nous avons tracés. La figure 78 indique très clairement qu'un courant très intense et qui s'étend sur presque toute la colonne d'eau, existe du côté ouest et s'étale sur une largeur de près du tiers du Détroit. Le signe + indique une orientation de 235° , soit sud ouest. Nous avons osé tracer une ligne de courant nul en dépit de l'absence de données du côté est dans les grandes profondeurs, car la tendance des données vicinales semble suggérer sa présence. La possibilité d'un contre-courant dirigé vers 55° (nord est) serait alors impliquée: il ramènerait l'eau de Atlantique vers l'océan Arctique. S'il en est vraiment ainsi, les valeurs de transport calculées par Sadler devraient être diminuées bien que pour le moment nous n'ayons pas la moindre idée de la proportion appropriée.

Nous montrons dans la figure 79 la composante transversale (325°) du courant moyen. Nous ne devons pas oublier qu'ici, le choix de l'orientation moyenne du lit est cruciale. Si le lecteur est prêt à accepter notre choix, les courants transversaux semblent posséder une structure tout à fait intéressante. Les flèches indiquent vers quelle côte la composante du courant est dirigée; les contours de 0 indiquent les positions où il n'y a pas de courant transversal. Nous notons qu'il y a des courants transversaux appréciables à 100 mètres aux stations 1 et 2 de Sadler. Nous montrons dans la figure 80 la composante transversale pour un choix d'orientation de 220° , qui est l'autre valeur extrême de l'orientation. Bien que cette composante soit différente, la situation physique demeure inchangée. Nous ne pouvons pas commenter sur les données à la station 3 à cause des problèmes présentés par ces données. Le courant dirigé contre la côte est encore présent à 650 mètres à la station 1; dans ce cas encore nous ne pouvons pas éviter la conclusion qu'il doit se produire une circulation d'upwelling le long de la côte du Canada.

Nous pouvons répéter la même décomposition, mais cette fois-ci, pour les oscillations lentes du courant moyen: nous avons tout simplement à retourner aux spectres de puissance calculés à la fréquence 0 et décomposés selon les axes choisis. Les figures 81 et 82 montrent les résultats de cette décomposition. Nous voyons que la composante longitudinale de la variabilité du courant moyen est à son maximum du côté canadien mais, qu'entre 100 et 200 mètres, la variabilité s'étend jusqu'au Groenland si nous sommes prêts à croire l'enregistrement à 100 mètres à la station 3 de Sadler.

La variabilité transversale du courant moyen est à peu près 10 fois moins forte que sa variabilité longitudinale. Si nous voulons croire à la structure présentée dans la figure 82, cette variabilité transversale d'autre part est fortement structurée; nous ne devons pas oublier que maintenant l'orien-

DISTANCE EN KMS

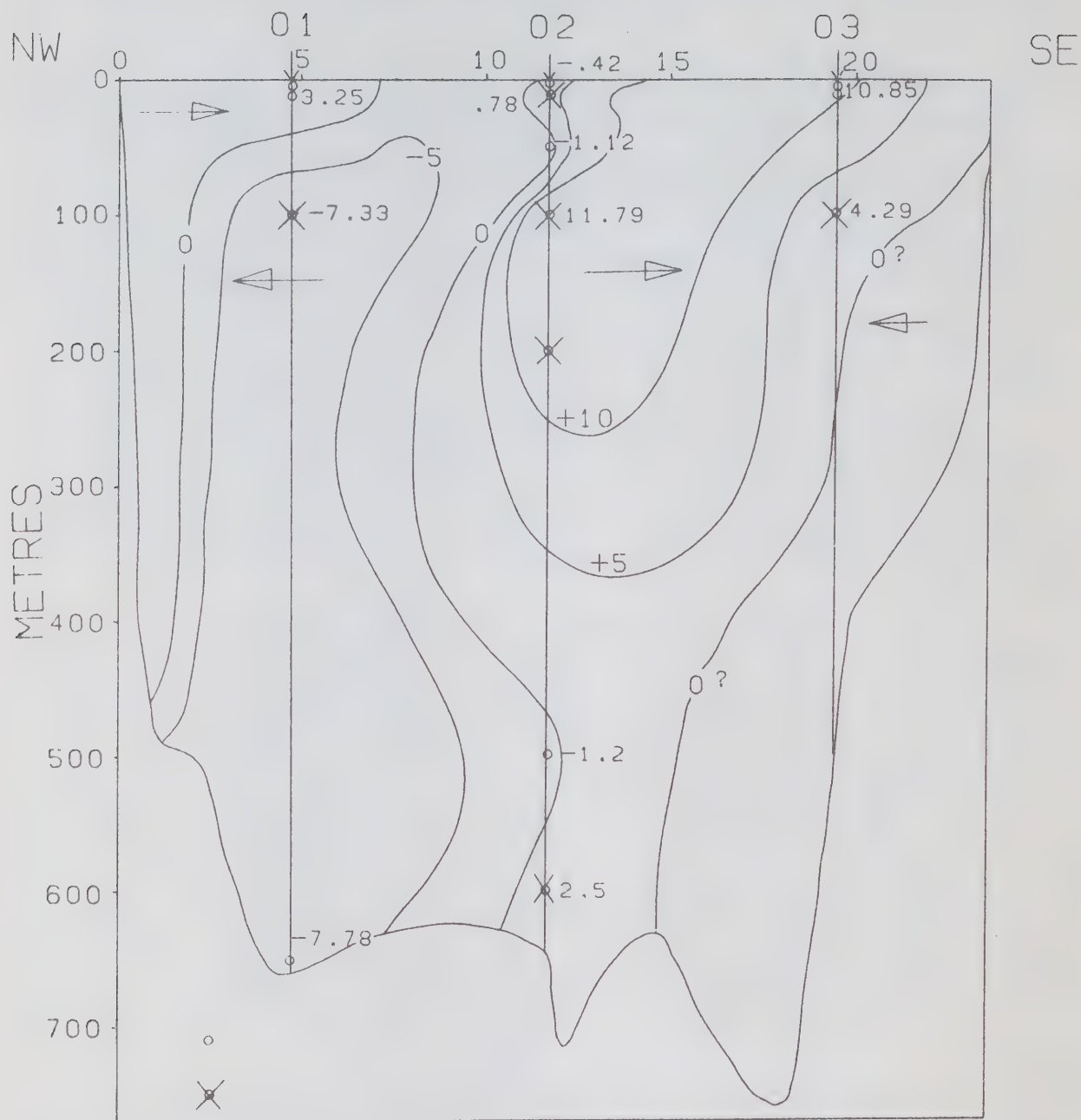


Fig. 79. Composante transversale (dirigée vers 315°) du courant moyen dans la section de Sadler. Notre interprétation nous suggère une zone de divergence entre 100 et 600 mètres au centre de la section, une zone de downwelling près de la surface et une zone d'upwelling du côté canadien.

tation des flèches n'est pas fixe, mais qu'elle indique tout au plus le changement relatif dans la structure de la variabilité du courant moyen transversal.

11.8 Directions prédominantes des courants

Les analyses que nous avons faites nous ont indiqué clairement que les directions prédominantes des courants à diverses profondeurs suivent très rarement l'orientation du lit. Nous venons tout juste de décomposer le courant moyen en composantes déterminées par l'orientation du lit, mais c'était exclusivement pour tenter de donner une interprétation physique aux résultats obtenus: le fait justement que le courant moyen ne suit pas le lit nous a aidé à déceler certains mouvements internes.

Nous procédons maintenant à la recherche de la direction préférée des courants observés. Nous ne nous attacherons pas aux mesures près de la surface où cette direction varie assez rapidement avec la profondeur. Nous établirons ces directions préférées aux autres profondeurs en consultant les Tableaux 7 et 8 et en inspectant les directions du courant moyen et des marées diurnes et semidiurnes. Le Tableau 11 montre ce choix de directions prédominantes en regard des trois composantes mentionnées et des choix de Chow et de Sadler. Nous incluons aussi l'angle de rotation nécessaire pour ramener les systèmes de référence choisis par ces auteurs vers la direction prédominante de flot. Notre décision est basée sur l'importance relative des composantes; de plus nous arrondissons nos chiffres à $\pm 5^\circ$. Nous notons que la direction prédominante des flots n'est pas nécessairement parallèle au lit.

Cette réorientation des systèmes de coordonnées ne change en rien la masse des résultats que nous avons accumulés jusqu'ici puisque nous avons pris soin de calculer exclusivement des quantités qui sont invariantes pour une transformation de rotation.

Nous avons profité toutefois du choix de cette orientation prédominante de flot pour recalculer les composantes X et Y des courants mesurés, décomposés en leurs véritables directions majeure et mineure. Nous avons aussi calculé les résidus observés entre les courants observés et les courants prédits à l'aide des composantes déduites par la méthode d'admittance dans les bandes diurne et semidiurne et des analyses harmoniques pour les fréquences plus élevées. Finalement nous avons calculé le spectre de puissance de ces vecteurs résiduels.

Nous montrons les spectres de puissance pour les stations installées dans la masse d'eau, soit à 50 mètres et plus pour les sections de Chow et Sadler, dans les figures 83 à 89. Les résidus mesurent la différence entre les courants observés et leur portion qui est cohérente avec le signal à Alert. Nous avons noté que les courants de marée sont effectivement rectilignes dans la masse d'eau et pourtant, les spectres de puissance des résidus nous indiquent clairement que la partie non cohérente des courants est un mouvement de rotation à droite qui a un pic à 2 cycles/jour. Or nous savons que pour la latitude 82°N , la période du mouvement d'inertie est de 12.1 heures, se confondant par conséquent avec le mouvement de la marée semidiurne et que ce mouvement se manifeste par une rotation à droite. Les pics

Tableau 11. Directions prédominantes des flots telles que déduites des analyses.

Auteur	Choix	Site	Courant moyen	Direction des trois composantes principales			Direction prédominante	Rotation nécessaire α
				Marée diurne	du courant	Marée semidiurne		
Chow	40°-220°	238 (50)	246°	239°	245°	245°	245°	+25°
		235 (50)	239°	234°	238°	238°	240°	+20°
		237 (50)	243°	238°	245°	245°	245°	+25°
Sadler	45°-225°	182 (100)	225°	227°	217°	220°	220°	-5°
		200 (650)	212°	223°	221°	220°	220°	-5°
		235 (100)	211°	222°	216°	215°	215°	-10°
		232 (500)	115°	235°	234°	235°	235°	+10°
		236 (600)	322°	228°	219°	220°	220°	-5°

à 182(100) (Fig. 86) et 235(100) (Fig. 88) pour S_- tombent sur la bande semidiurne; il nous semble donc que la partie incohérente dans les courants de marée correspond à des mouvements d'inertie dans le Détroit de Robeson. Nous notons finalement que de tels mouvements ne sont pas évidents aux stations près du fond, 200(650) (Fig. 87) et 232(500) (Fig. 89).

12. REMERCIEMENTS

Je remercie MM. Chow et Sadler qui ont attiré mon attention sur les données de courant qu'ils ont recueillies dans le Détroit de Robeson et qui les ont mises à ma disposition pour des études ultérieures. M. F.G. Barber a aidé dans la préparation du texte et révisé son contenu et Mme Margaret K. Johnstone a rassemblé et tapé le manuscrit.

13. BIBLIOGRAPHIE

- Chow, R.K. 1975a. Near-surface current in Robeson Channel. Res. Dev. Br., Dept. Nat. Def., DREO Rep. No. 709: v+63 p.
- Chow, R.K. 1975b. A simple model for the near-surface currents in Robeson Channel. Res. Dev. Br., DND. DREO Rep. No. 713: v+24 p.
- Fofonoff, N.P. 1969. Spectral characteristics of internal waves in the ocean. Deep-Sea Res., Supp. to Vol. 16(5): 58-71, appendix.
- Godin, G. 1967. L'analyse d'observations sur les courants. Revue Hydrographique Internationale 46: 159-175.
- Godin, G. 1976. The reduction of current observations with the help of the admittance function. M E D S Tech. Note No. 14: 13 p.
- Gonella, J. 1972. A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series. Deep-Sea Res. 19: 833-846.
- Mooers, C.N.K. 1973. A technique for the cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarized components and rotational invariants. Deep-Sea Res. 20: 1129-1141.
- Sadler, H.E. 1976. The flow of water through Nares Strait. Res. Dev. Br., Proc. Lond. Math. Soc. 20: 148-181.

14. LISTE DES FIGURES (* microfiche, dans la poche)

1. L'emplacement géographique où Chow et Sadler ont effectué leurs mesures de courant.
2. Emplacement des amarrages de courantomètres. Les stations de Chow sont au nord et sont énumérées 1, 2, 3 de l'ouest à l'est. Les stations de Sadler sont au sud et sont énumérées de la même façon.
- 3*. Position dans la verticale des courantomètres dans la section de Chow. L'échelle verticale à gauche est en mètres. Les courantomètres sont indiqués par leur nombre de série.
- 4*. Position dans la verticale des courantomètres dans la section de Sadler. Les points indiqués par x sont des points où en sus du courant on a mesuré la température. Le courantomètre à 200 mètres dans la station 2 n'a pas fonctionné. Les chiffres 5, 10, 15 et 20 indiquent la distance en kilomètres à partir de la côte du Canada. 01, 02 et 03 sont les nombres désignant les stations.
- 5*. Enregistrements simultanés de courant à la station 2 de Chow. Ceux-ci sont divisés en groupes de 12 heures. Le diagramme du haut donne le niveau d'eau à Alert sur l'intervalle de temps donné. Le diagramme en dessous donne la direction moyenne du Détroit de Robeson, soit 55° (nord est). L'échelle qui suit est la même pour toutes les observations de courants qui sont présentées dans cette figure et celles qui suivent. Dans la même verticale, les chiffres qui suivent indiquent les profondeurs auxquelles les enregistrements ont été accumulés. Le vecteur marqué par 1, par exemple, indique la direction et l'intensité du courant à 1 heure, à la profondeur appropriée. Si l'on suit maintenant l'évolution des diagrammes de gauche à droite, on peut voir l'évolution des courants sur un intervalle de 12 heures dans une même colonne d'eau entre 2 et 75 mètres à la station 2 de Chow.
- 6*. Enregistrements simultanés du niveau d'eau à Alert et des courants mesurés aux stations 1, 2 et 3 de Chow, à 50 et 75 mètres. On suit l'évolution des courants de la même façon que dans la figure 5, excepté que maintenant les mesures sont dans l'horizontale.
- 7*. Enregistrements simultanés à la station 2 de Sadler des courants dans la même colonne d'eau en regard du niveau d'eau à Alert et de l'orientation du Détroit de Robeson.
- 8*. Portion des enregistrements simultanés près de la surface aux stations 1, 2 et 3 de Sadler en regard du niveau d'eau à Alert et de l'orientation du Détroit de Robeson.
- 9*. Enregistrements simultanés à 100 mètres des courants aux stations 1, 2 et 3 de Sadler en regard du niveau d'eau à Alert et de l'orientation du Détroit de Robeson.
- 10*. Composantes du courant moyen à la station 2 de Chow dans les directions choisies par cet auteur; on peut voir l'augmentation progressive de la composante X avec la profondeur.

- 11*. Composantes du courant moyen aux stations 1, 2 et 3 de Chow dans les directions choisies par cet auteur aux niveau de 50 et 75 mètres; on peut remarquer le différent régime à 75 mètres.
- 12*. Composantes du courant moyen à la station 2 de Sadler dans les directions choisies par l'auteur; il aurait été plus intéressant d'obtenir le même type d'information pour sa station 1.
- 13*. Composantes du courant moyen près de la surface aux station 1, 2 et 3 de Sadler dans les directions choisies par l'auteur. La composante Y à la station 3 semble très stable mais malheureusement, elle est dirigée résolument contre la côte.
- 14*. Composantes du courant moyen à 100 mètres aux stations 1, 2 et 3 de Sadler dans les directions choisies par l'auteur; nous notons la grande valeur de la composante X à la station 1.
- 15*. Graphique illustrant les observations de courants décomposées dans un système cartésien et leur représentation par une somme d'ondes composantes de marées. X et Y sont les orientations choisies par Chow; on doit noter d'autre part que la composante Y est à la gauche de X, comme il se doit dans tout système de référence trigonométrique. La marque LP suivant X et Y indique le résultat du filtrage passe-bas des observations; le graphique donne donc l'évolution du courant moyen dans le temps. Les graphiques dénotés par X et Y sont les données de courant originales après lissage et décimation au taux d'une observation à l'heure. La marque PR après X ou Y montre les courants prédits à l'aide des ondes de marée déduites des observations à l'aide de la méthode harmonique. La marque ER indique la différence entre le courant observé (mais débarrassé du courant moyen) et le courant prédit: ces différences peuvent s'appeller "erreur" et elles aident à décider du succès ou de la faiblesse de l'analyse. Dans le présent graphique l'indication: 237 (50) indique qu'il s'agit des données du courantomètre 237 à 50 mètres à la station 1 de Chow.
- 16*. Même présentation pour la station 2 de Chow: courantomètre 232 à 2.25 mètres.
- 17*. Chow, Station 2: courantomètre 233 à 7.25 mètres.
- 18*. Chow, Station 2: courantomètre 236 à 20 mètres.
- 19*. Chow, Station 2: courantomètre 235 à 50 mètres.
- 20*. Chow, Station 2: courantomètre 234 à 75 mètres.
- 21*. Chow, Station 3: courantomètre 238 à 50 mètres.
- 22*. Les diagrammes qui suivent se rapportent aux stations de Sadler; les composantes X et Y sont celles qu'il a choisies comme système de référence. Encore une fois, on a pris soin que Y soit à gauche de X. Sadler, Station 1: courantomètre 234 à 5 mètres.

- 23*. Sadler, Station 1: courantomètre 182 à 100 mètres. Sans nul doute, ceci est l'enregistrement le plus intéressant de toute la série de données de courant. Nous notons la forte instabilité du courant à ce niveau, ou celle, du moins, des enregistrements.
- 24*. Sadler, Station 1: courantomètre 200 à 650 mètres. Le courant moyen y est encore très appréciable bien que variable.
- 25*. Sadler, Station 2: courantomètre 237 à 5 mètres.
- 26*. Sadler, Station 2: courantomètre 233 à 10 mètres.
- 27*. Sadler, Station 2: courantomètre 238 à 50 mètres.
- 28*. Sadler, Station 2: courantomètre 235 à 100 mètres. Le courant moyen y est beaucoup plus variable qu'au même niveau à la station 1.
- 29*. Sadler, Station 2: courantomètre 232 à 500 mètres. Le courant moyen y est faible et variable.
- 30*. Sadler, Station 2: courantomètre 236 à 600 mètres. Si on compare cet enregistrement avec celui à 650 mètres (Figure 24), on remarque que le régime de courant y est beaucoup plus paisible et que la marée y est forte et régulière.
- 31*. Sadler, Station 3: courantomètre 193 à 10 mètres. Le courant moyen (composante Y) est remarquablement constant, mais résolument dirigé vers la côte. Il se peut qu'il y ait eu erreur dans l'orientation.
- 32*. Sadler, Station 3: courantomètre 201 à 100 mètres. Les résidus X-ER et Y-ER indiquent par leur intensité étant aussi forte que le signal original, que l'enregistrement est fautif. Si on suit quand même l'évolution du courant moyen (qui est moins affecté par des erreurs de temps), on voit que celui-ci, bien qu'étant d'intensité appréciable, est fort variable.
- 33*. Les figures 33 à 50 donnent les spectres de puissance des mêmes suites d'observations étudiées par la méthode harmonique dans les figures 15 à 33. Cette fois-ci la représentation est spectrale plutôt que temporaire et le spectre est évalué à toutes les fréquences plutôt qu'exclusivement sur celles des ondes de marées.

Les éléments d'un spectre de puissance d'une suite vectorielle sont décrits dans la section A de ce rapport. Dans les figures qui suivent, les trois diagrammes donnent d'abord le spectre de puissance pour les fréquences négatives, $S(-)$; celui pour les fréquences positives, $S(+)$, et le spectre total $S^t = S(-) + S(+)$. Les fréquences négatives correspondent aux composantes spectrales du courant polarisées à droite, les positives, celles polarisées à gauche. Le spectre de puissance total donne une mesure de l'énergie cinétique contenue dans la bande de fréquence. Les spectres sont évalués sur des fréquences espacées sur un intervalle d'un cycle/24 heure (.0417 c/h) jusqu'à la fréquence de repliement. Le deuxième diagramme donne l'orientation de l'ellipse composante par rapport à l'axe de référence choisi par l'auteur

(Chow ici); dans les tableaux les orientations sont données dans le système trigonométrique qui les rend faciles à interpréter et en enlève toute ambiguïté. Dans le diagramme présenté, cette orientation n'est fiable que dans les trois premières bandes de fréquences où l'énergie est appréciable; les autres orientations sont fortement entachées par le bruit à cause de la faiblesse de l'énergie.

Le troisième diagramme donne les coefficients de rotation et de stabilité. Le coefficient de rotation, qui peut varier entre -1 et +1, mesure la tendance de l'ellipse à tourner à droite (-) ou à gauche (+). La valeur 1 indique que l'ellipse est un cercle parfait: la valeur 0 indique qu'elle a dégénéré en une droite. Le coefficient de stabilité mesure la tendance de la composante du courant à se tenir dans la même direction ou à tourner: la valeur 1 indique qu'elle pointe toujours dans la même direction. Le coefficient varie entre 0 et 1. Ces deux coefficients ne donnent des valeurs fiables que lorsque l'énergie dans la bande est appréciable: dans notre cas, ceci se limite aux trois premières bandes. La figure 33 se rapporte à l'enregistrement de Chow, Station 1: courantomètre 237 à 50 mètres.

- 34*. Spectre de puissance et mesures associées. Chow, Station 2: courantomètre 232 à 2 mètres.
- 35*. Spectre de puissance. Chow, Station 2: courantomètre 233 à 7 mètres.
- 36*. Spectre de puissance. Chow, Station 2: courantomètre 236 à 20 mètres.
- 37*. Spectre de puissance. Chow, Station 2: courantomètre 235 à 50 mètres.
- 38*. Spectre de puissance. Chow, Station 2: courantomètre 234 à 75 mètres.
- 39*. Spectre de puissance. Chow, Station 3: courantomètre 238 à 50 mètres.
- 40*. Spectre de puissance. Sadler, Station 1: courantomètre 234 à 5 mètres.
- 41*. Spectre de puissance. Sadler, Station 1: courantomètre 182 à 100 mètres.
- 42*. Spectre de puissance. Sadler, Station 1: courantomètre 200 à 650 mètres.
- 43*. Spectre de puissance. Sadler, Station 2: courantomètre 237 à 5 mètres.
- 44*. Spectre de puissance. Sadler, Station 2: courantomètre 233 à 10 mètres.
- 45*. Spectre de puissance. Sadler, Station 2: courantomètre 238 à 50 mètres.
- 46*. Spectre de puissance. Sadler, Station 2: courantomètre 235 à 100 mètres.
- 47*. Spectre de puissance. Sadler, Station 2: courantomètre 232 à 500 mètres.
- 48*. Spectre de puissance. Sadler, Station 2: courantomètre 236 à 600 mètres.
- 49*. Spectre de puissance. Sadler, Station 3: courantomètre 193 à 10 mètres.
- 50*. Spectre de puissance. Sadler, Station 3: courantomètre 201 à 100 mètres.

51. Vecteurs des courants moyens mesurés par Chow et Sadler. Le chiffre au bout du vecteur indique la profondeur à laquelle il correspond. Le courant moyen à 5 mètres à la station 2 de Sadler est presque parallèle à celui à 50 mètres mais il est moins intense. Les orientations à la station 3 sont problématiques.
- 52*. Courants moyens dans la verticale pour la section de Chow. Le chiffre à gauche donne le nombre du courantomètre. Le courant moyen est donné par une amplitude en cm/sec et une orientation (dans le système trigonométrique). Des contours d'orientation et d'intensité ont été tracés.
53. Courants moyens dans la verticale pour la section de Chow. Les nombres des courantomètres ont été omis. Les courants moyens sont donnés par une amplitude en cm/sec et une orientation (trigonométrique). Nous avons tracé des contours d'intensité (pointillés) et d'orientation (continus). Nous n'avons pas pu pousser ceux-ci du côté du Greenland. Nous n'avons pas hésité à tirer le contour de 30 cm/sec jusqu'à 400 mètres dans la station 1 car des calculs supplémentaires de cohérence entre les enregistrements à 100 et 650 mètres indiquent une bonne cohérence entre les courants moyens à ces deux profondeurs: celui-ci doit donc s'étendre sur toute la verticale.
- 54*. Puissance spectrale pour les basses fréquences dans la verticale pour la section de Chow. Le nombre du courantomètre y est donné explicitement. On a représenté la puissance spectrale par trois chiffres pour chaque station: (a) la puissance totale, (b) l'orientation moyenne de l'ellipse (trigonométrique) et (c) le coefficient de rotation. Ainsi nous avons pu tracer des contours de puissance spectrale et de zone de rotation. Le contour 0 (ligne continue) sépare les zones où les fluctuations du courant moyen ont tendance à tourner vers la droite (-) ou vers la gauche (+). L'intensification de la puissance spectrale avec la profondeur indique que le courant moyen tend à fluctuer plus fortement à mesure qu'on s'enfonce dans la colonne d'eau.
55. Puissance spectrale pour les basses fréquences dans la section de Sadler. Les trois nombres à chaque station ont le même sens que dans la figure 54. Les contours de puissance spectrale et de rotation ont aussi le même sens. Une valeur du coefficient de rotation moindre que .1 indique que le courant à ce point est quasi rectiligne: dans ce cas le sens d'orientation a fort peu d'importance pratique.
- 56*. Puissance spectrale dans la bande semidiurne pour la section de Chow. Nous voyons que les courants sont rotatoires et tournent vers la gauche jusqu'à 50 mètres.
57. Puissance spectrale dans la bande semidiurne pour la section Sadler. Les composantes du courant sont rotatoires et tournent à gauche près de la surface et du fond. Les composantes dans la masse d'eau, d'autre part, sont quasirectilinéaires avec une faible tendance à tourner à droite.
58. Carte cotidale pour l'onde M_2 , qui contribue le plus fortement à la puissance spectrale dans la bande semidiurne. Cette carte est basée

sur les données contenues dans le Tableau 6. Nous avons tracé des lignes de cophase (continues) et de coamplitude (pointillées).

59. Demi-grand axe M de l'onde semidiurne M_2 dans l'horizontale. Le chiffre le long du vecteur donne la profondeur à laquelle il correspond; la phase au bout est sa phase de Greenwich. La phase à l'origine des stations 2 de Chow et Sadler est la phase correspondant à la phase de la marée verticale due à M_2 donnée dans la figure 58. Nous avons aussi tracé la ligne de cophase 105° correspondant à cette marée verticale. Finalement nous avons tracé un trait épais pour indiquer la moyenne verticale pondérée de l'onde M_2 pour les trois stations de Sadler et la station 2 de Chow. Cette moyenne verticale pondérée (ainsi que sa phase), intégrée à travers la section, devrait correspondre de très près à la valeur déduite de la carte cotidale 58 à l'aide de l'équation de continuité. Nous n'avons pas essayé d'estimer cette valeur car il se peut que cette carte cotidale soit fort peu exacte.
- 60*. Eléments de l'ellipse composante de M_2 dans la section verticale de Chow. Ces éléments sont les suivants: M , le demi-grand axe en cm/sec; θ l'orientation en degré trigonométriques; m , le demi-petit axe et g , la phase de Greenwich. On peut voir que l'ellipse composante tend à s'orienter de plus en plus vers la droite alors que la profondeur augmente; de même les phases de Greenwich diminuent.
61. Eléments de l'ellipse composante de M_2 dans la section verticale de Sadler. En dépit de certaines irrégularités dans les analyses, il semble que le courant semidiurne dû à M_2 est assez homogène dans le corps de la masse d'eau. Nous avons tenté de tracer des contours de vitesse et de phase.
- 62*. Puissance spectrale pour la bande diurne dans la verticale pour la section de Chow; elle ressemble d'assez près au profil pour la bande semidiurne bien que les énergies soient beaucoup moindres.
63. Puissance spectrale pour la bande diurne dans la verticale pour la section de Sadler.
- 64*. Carte cotidale pour l'onde K_1 ; l'onde qui contribue le plus fortement à la puissance dans la bande diurne. Cette carte est basée sur toutes les données contenues dans le Tableau 6. Cette carte semble inutilement compliquée.
65. Carte cotidale pour l'onde K_1 basée exclusivement sur les données fiables contenues dans le Tableau 6.
- 66*. Demi-grand axe de l'onde K_1 ainsi que sa phase pour diverses profondeurs aux stations de Chow et Sadler. Il a été impossible cette fois-ci de calculer la moyenne verticale pondérée de cette composante de courant. A l'arrière plan nous avons mis la première carte cotidale proposée pour K_1 ainsi que quelques phases correspondant à la marée verticale due à K_1 .
67. Même données de courant pour K_1 que dans la figure 66 avec, à l'arrière plan, la deuxième carte cotidale proposée pour K_1 .

- 68*. Eléments de l'ellipse composante de K_1 dans la verticale pour la section de Chow.
- 69. Eléments de l'ellipse composante de K_1 dans la verticale pour la section de Sadler.
- 70*. Puissance spectrale pour la bande terdiurne dans la verticale pour la section de Chow.
- 71*. Puissance spectrale pour la bande terdiurne dans la verticale pour la section de Sadler.
- 72*. Puissance spectrale pour la bande quaterdiurne dans la verticale pour la section de Chow.
- 73*. Puissance spectrale pour la bande quaterdiurne dans la verticale pour la section de Sadler.
- 74*. Puissance spectrale pour la bande 5-diurne dans la verticale pour la section de Chow.
- 75*. Puissance spectrale pour la bande 5-diurne dans la verticale pour la section de Sadler.
- 76*. Puissance spectrale pour la bande 6-diurne dans la verticale pour la section de Chow.
- 77*. Puissance spectrale pour la bande 6-diurne dans la verticale pour la section de Sadler.
- 78. Composante du courant moyen dans la section de Sadler dirigée le long du lit dont l'orientation a été choisie à 225° (trigonométrique). Le signe + indique que le courant va vers le sud ouest; le signe - indique un flot vers le nord est. Nous avons indiqué ce flot en dépit de l'absence presque totale de mesures dans la région où il a été présumé.
- 79. Composante transversale (dirigée vers 315°) du courant moyen dans la section de Sadler. Notre interprétation nous suggère une zone de divergence entre 100 et 600 mètres au centre de la section, une zone de downwelling près de la surface et une zone d'upwelling du côté canadien.
- 80*. Composante transversale du courant moyen pour un choix d'orientation du lit égale à 220° .
- 81*. Composante de la puissance spectrale dans les basses fréquences dirigée le long du lit; elle mesure la variabilité du courant moyen dans cette direction.
- 82*. Composante transversale de la puissance spectrale dans les basses fréquences. Elle nous donne une idée de la forme que prend la fluctuation transversale; les directions des flèches toutefois changent d'orientation dépendant si le courant moyen augmente ou diminue.

- 83*. Spectre de puissance de la différence entre les courants observés et
à les courants prédits à l'aide du calcul d'admittance entre Alert et les
données de courants. Ces différences (ou résidus) tendent donc à
- 89*. mesurer la portion du mouvement de courant qui n'est pas cohérente avec
la marée verticale.

83*. 238(50)

84*. 235(50)

85*. 237(50)

86*. 182(100)

87*. 200(650)

88*. 235(100)

89*. 232(500)

15 741

